

VŠB–Technická Univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra výrobních strojů a konstruování



Metody nedestruktivní diagnostiky

Methods Non–destructiveDiagnostics

Student:

Eva Ďásková

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jan Blata

Ostrava 2011

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra výrobních strojů a konstruování

Zadání bakalářské práce

Student:

Eva Ďásková

Studijní program:

B2341 Strojírenství

Studijní obor:

2301R023 Technická diagnostika, opravy a udržování

Specializace:

70 Technická diagnostika, opravy a udržování

Téma:

Metody nedestruktivní diagnostiky
Methods Non-destructive Diagnostics

Zásady pro vypracování:

Zpracujte ve formě studie návrh využití metod nedestruktivní diagnostiky ke kontrole technického stavu strojních zařízení, při použití dostupných měřicích přístrojů a metod.

V rámci zadání zpracujte:

1. Rešerši a analýzu dané problematiky.
2. Ideově technický návrh řešení dané problematiky.
3. Zpracujte aplikaci na daný objekt.
4. Proveďte konkrétní provozní vyhodnocení.

Další bližší specifikace provede vedoucí bakalářské práce.

Seznam doporučené odborné literatury:

HELEBRANT, F. – ZIEGLER, J.: *Technická diagnostika a spolehlivost II – Vibrodiagnostika*. VŠB – TU Ostrava, Ostrava 2004, 1. vydání, 178 s., ISBN 80 – 248 – 0650 – 9.

TŮMA, J.: *Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT*. Sdělovací technika Praha 1997, 174 s., ISBN 80-901936-1-7.

MILÁČEK, S.: *Měření a vyhodnocování mechanických veličin*. ČVUT v Praze 2001, 231 s., ISBN 80.01-02417-2

JENČÍK, J. – VOLF, J. A KOL.: *Technická měření*. ČVUT v Praze 2003, 212 s., ISBN 80-01-02138-6

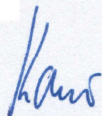
Podkladové materiály - ADASH s.r.o., Brüel Kjaer, SKF Ložiska a.s.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

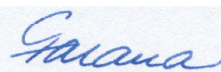
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jan Blata**

Datum zadání: 17.12.2010

Datum odevzdání: 23.05.2011



doc. Dr. Ing. Ladislav Kovář
vedoucí katedry

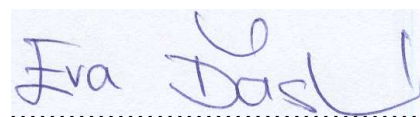


prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci, včetně příloh, vypracovala samostatně pod vedením vedoucího práce a uvedla jsem všechny podklady a literaturu.

V Ostravě: 19. 5. 2011


A handwritten signature in blue ink, reading "Eva Dášková", written over a dotted line.

Podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byla seznámena s tím, že na moji diplomovou (bakalářskou) práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́доміі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB–TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou (bakalářskou) práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová (bakalářská) práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové (bakalářské) práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou (bakalářskou) práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB–TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB–TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́доміі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 19. 5. 2011



Podpis

Jméno a příjmení autora práce: Eva Ďásková

Adresa trvalého pobytu autora práce: Mrsklesy 28, Hlubočky 3, 783 65

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Ďásková, E. *Metody nedestruktivní diagnostiky: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra výrobních strojů a konstruování 2011, 52s., Vedoucí práce: Blata, J.

Tato bakalářská práce se zabývá způsoby metod nedestruktivní diagnostiky. Všechny tyto metody slouží k určení, zda materiál, součást či celý stroj nevykazuje chybu, díky níž by mohly nastat problémy jak v provozu, tak v dalším výrobním procesu. Při použití jakékoli metody se výrobky neporuší a nezmění se ani jejich užité vlastnosti. V této práci jsou teoreticky a srozumitelně popsány metody, které jsou v praxi nepostradatelné.

Praktická část se zabývá kapilární zkouškou. Je zde popsán podrobný postup toho, jak se tato zkouška provádí v praxi, na jaké materiály, díly a předměty je vhodná aplikovat. Díky této zkoušce jsme schopni rozpoznat případné indikace – vady na materiálu, které jsou viditelné pouhým lidským okem nebo pod UV lampou. V závěru je uvedeno, jak můžeme vady v materiálu napravit, kdy je ještě možná oprava a kdy je třeba již součást či materiál znehodnotit.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

Ďásková, E. *Methods Non-destructiveDiagnostics: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University ofOstrava, Faculty ofMechanicalengineering, Department ofProductionmachines and designed, 2011, 52p., Thesis head: Blata, J.

This bachelor thesis is devoted to ways and methods of non-destructive diagnostics. All of these methods serve to determine whether the material, part of or whole machine have faults, which may lead to problems not only in operation yet also in the further production program. Through using any method, the products do not fail and their use does not change. This piece of work contains theoretical and comprehensibly described methods, which are indispensable in practice. The practical part deals with a capillary test. It presents a detailed procedure for executing this test in pratice and details about which materials, parts and objects are suitable for testing. This test allows us to determine certain indications– faults with material, which are visible from the naked eye or under a UV lamp. The conclusion deals with the question of removing faults in the material, when remedial measures are still possible and when it is necessary to evaluate the material or part of it.

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A ZKRATEK	9
ÚVOD	10
1 DEFINICE NEDESTRUKTIVNÍHO ZKOUŠENÍ	11
2 METODY NEDESTRUKTIVNÍHO ZKOUŠENÍ	11
2.1 Prozařování (RT – Radiographic Testing)	11
2.1.1 Historie	11
2.1.2 Úvod do prozařování	12
2.1.3 Základy fyziky záření	14
2.1.4 Vznik rentgenového (X) záření a gama záření	16
2.1.5 Způsoby prozařování	16
2.2 Metoda vířivých proudů (ET – Eddy Current Testing)	17
2.2.1 Historie	17
2.2.2 Úvod do měření vířivými proudy	18
2.2.3 Princip vířivých proudů	18
2.2.4 Využití metody vířivých proudů	20
2.2.5 Aplikace metody vířivých proudů ve strojírenství	20
2.3 Zkoušky ultrazvukem (UT – Ultrasonic Testing)	21
2.3.1 Historie	21
2.3.2 Úvod ke zkoušení ultrazvukem	21
2.3.3 Základní pojmy	21
2.3.4 Druhy ultrazvukových vln	23
2.3.5 Metody ultrazvukové defektoskopie	24
2.3.6 Ultrazvukové přístroje	26
3 ZKOUŠENÍ KAPILÁRNÍ METODOU (PT – Penetrant Testing).....	28
3.1 ČSN EN 571-1 Nedestruktivní zkoušení – Kapilární zkouška	28
3.2 Princip kapilární metody.....	28
3.3 Pomůcky a zkušební prostředky pro PT.....	30
3.4 Jednotlivé kroky metody a zkušební systém	33
3.4.1 Příprava a předčištění zkušební plochy – teoretická část.....	35
3.4.2 Příprava a předčištění – praktická část	36
3.4.4 Nanášení vývojky	39
3.5 Oblasti aplikace a omezení při kapilární zkoušce.....	40
3.5.1 Význam přípravy zkušební povrchu	40

3.5.2	Mechanická úprava.....	41
3.5.3	Fyzikálně chemické předčištění	42
3.5.4	Zkušební rozsah a předčištění	43
3.6	Mezičištění a sušení	43
3.7	Vývojka a proces vyvolání	44
3.8	Konečná fáze zkoušky	44
3.9	Vyhodnocení.....	48
4	ZÁVĚR.....	49
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	51
	SEZNAM PŘÍLOH	53

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A ZKRATEK

Značka	Veličina	Jednotka SI
A_0	Maximální výchylka částic	m
$a(t)$	Výchylka částic z rovnovážné polohy v čase t	m.s^{-1}
c	Rychlost šíření vlny	m.s^{-1}
f_s	Frekvence snímače	Hz
p	Akustický tlak	Pa
t	Čas	s
T	Perioda	s
v	Rychlost	m.s^{-1}
x	Vzdálenost kmitajícího bodu od počátku	m
z	Akustická impedance prostředí	Pa.s.m^{-1}
γ	Vodivost - konduktivita materiálu	S.m.m^{-2}
ϵ	Permitivita prostředí	F.m^{-1}
μ	Permeabilita materiálu	H.m^{-1}
π	Konstanta	-
ρ	Měrná hmotnost prostředí	kg.m^{-3}
σ	Hloubka vniku	m
ω	Kruhová frekvence	rad.s^{-1}

Zkratka	Význam
ET	Eddy Current Testing – Metody vířivých proudů
PT	Penetrant Testing – Kapilární zkouška
RT	Radiographic Testing – Metoda prozařování
UT	Ultrasonic testing – Zkoušky ultrazvukem

ÚVOD

Naše působení v této technologii má tak slavné předky a historii, na něž můžeme být náležitě pyšní a hrdí. Nedestruktivní zkoušení pochází z dědictví, díky kterému se podařilo zabránit nespočetně zraněním a ztrátám na životech, podařilo se zachovat nejužitečnější díla tvůrčích lidí a prodloužilo jejich aplikaci po dobu několika generací.

Velkým vědcům se v 18. a 19. století podařila objevit řada fyzikálních zákonů, jejich veličin a matematické teorie. Bez těchto aplikací a vzorců bychom se dnes v oboru nedestruktivního zkoušení neobešli. Tito pánové zpracovali a popsali řady výzkumů, zpráv a teorií, díky nimž dnes máme řadu moderních prostředků pro komunikaci, měniče, které nám umožní pozorovat vlastnosti materiálů, geometrii a změny, vynikající zařízení pro zobrazení a rozbor údajů z nedestruktivního zkoušení. Pokrok, který nastal v oblasti komunikačních systémů, umožňuje detekci, přenos a analýzu obrazů zkoušených objektů a měřených vlastností, které se zjistily při nedestruktivním zkoušení prostřednictvím družic, televize, rádia, kabelů, optických vláken nebo laseru. Přímá komparace obrazů vytvořených naprosto jinými a odlišnými médii, používanými pro nedestruktivní zkoušení, umožňuje lepší kvalitu rozborů a dosažení dokonalejších vzájemných vztahů mezi různými zkušebními metodami.

1 DEFINICE NEDESTRUKTIVNÍHO ZKOUŠENÍ

Tato kapitola byla zpracována dle literatury [7]

Non-destructivetesting–NDT. Nedestruktivní zkoušení se zabývá metodami pro zkoušení určitého produktu, předmětu, systému nebo materiálu bez toho, aniž by byla jakkoli porušena nebo spíše narušena jejich budoucí použitelnost v jejich uplatnění a aniž by ovlivnila schopnost plnit předpokládanou funkci.

Zkušební nedestruktivní metody se všeobecně používají ke zjišťování necelistvostí materiálu a využívají přiměřenou formu energie pro stanovení materiálových vlastností nebo pro indikování přítomnosti materiálových diskontinuit, které mohou být plošné, vnitřní a skryté. Řada dalších technologií, např. radioastronomická měření, měření proudu, napětí, jsou nedestruktivní zkoušení, ale specificky se nepoužívají pro hodnocení materiálových vlastností. Např. radar a sonar se klasifikují jako nedestruktivní zkoušení, když se používají k prozkoumání přehrad, ale pokud se používají ke zmapování dna, už se nejedná o nedestruktivní zkoušení.

2 METODY NEDESTRUKTIVNÍHO ZKOUŠENÍ

2.1 Prozařování (RT–RadiographicTesting)

Tato kapitola byla zpracována dle literatury [6,7,8,9]

2.1.1 Historie

Historická noc z 8. na 9. listopadu 1895 se stala mezníkem v odvětví fyziky, lékařství a atomistiky. Tehdy profesor *Wilhelm Conrad Röntgen* (1845–1923, který později byl univerzitním profesorem a významným fyzikem), objevil záření X. Prvním rentgenovým snímkem byla ruka jeho ženy se snubním prstenem (*viz Obr. 1*) a vznikl dne 23.1.1896.

Později se ukázalo, že záření má bohužel i škodlivé účinky a že může nevhodně a bohužel i nevratně poškodit jakýkoliv živý organismus. V roce 1898 uveřejňuje Röntgen zákonitosti nového druhu záření: fluorescenci, průchod hmotami, fotografické účinky, vznik rozptýleného a sekundárního záření, důkaz o nehomogenitě paprsků. Zavádí označení měkkých a tvrdých paprsků, zjišťuje závislost průchodu na tloušťce a hustotě látky a na atomové váze.

U nás se o použití rentgenu v lékařství zasloužil v roce 1897 pan *Rudolf Jedlička*. O rok později, v roce 1898, *Maria a Pierre Curie* objevili radioaktivitu. V téměř o deset let později, v roce 1901, byla udělena první Nobelova cena za Rentgenové záření.



Obr. 1 – První rentgenový snímek [6]

2.1.2 Úvod do prozařování

Paprsky rentgenového záření a záření gama mají tu vlastnost, že mohou pronikat pevnými látkami, jako jsou např. kovy, beton a umělé hmoty. Projde-li záření zkoušeným předmětem, bude množství záření vycházející z předmětu menší než množství záření, které na něj dopadá. Jak je zřejmé, na skutečné tloušťce materiálu závisí velikost tohoto zeslabení.

V praxi se prozařování může používat jak na místech pracoviště, tak přímo v terénu. Jednoduše se dají zkontrolovat svary trubek u kotle, které když se prozáří, zčervenají a jdou na nich rozpoznat špatné svary (viz Obr. 2). Díky přenosným přístrojům není problém překontrolovat svaru plynovodu (viz Obr. 3).



Obr. 2 – Kontrola svarů trubek membránové stěny kotle prozářením [16]



Obr. 3 – Kontrola svaru plynovodu mobilním izotopem [16]

2.1.3 Základy fyziky záření

Záření je možno všeobecně definovat jako šíření energie prostorem. Pokud se ovšem tato energie šíří prostřednictvím vlnění, jde o elektromagnetické vlnění (rentgenové záření a záření gama). Jsou-li nositeli energie hmotné částice (elektrony, neutrony, částice alfa), hovoříme o korpuskulárním nebo-li částicovém záření. Stavba atomu při rentgenovém záření je popsána na Obr. 4.

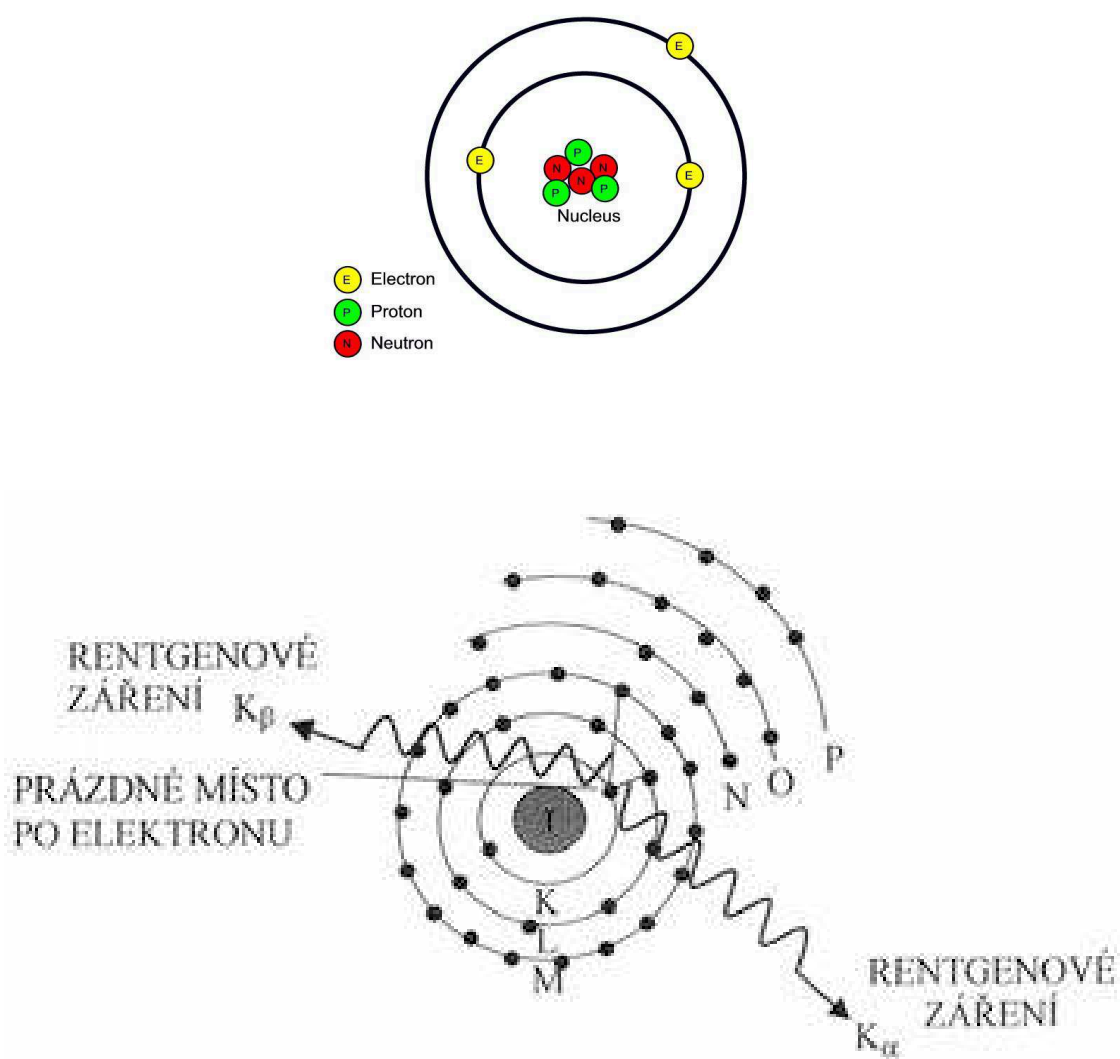
Atomy se skládají ze tří různých druhů elementárních částic. Jedná se o proton – má poměrně velkou hmotnost a nese kladný náboj, neutron – má stejnou hmotnost jako proton a nemá žádný elektrický náboj, elektron – má jen asi jednu dvoutisícinu hmoty protonu a záporný elektrický náboj.

Atomy obsahují různý počet elementárních částic. Počet a typ elementárních částic určuje, o jaký druh atomu se jedná.

Záření X (rentgenové) – Vzniká tehdy, jestliže urychlené elektrony předávají část své energie za spolupůsobení atomového jádra. Energie vzniklého rentgenového záření je tím

vyšší, čím větší je rychlost elektronů dopadajících na terčik. Je charakterizováno jako krátkovlnné fotonové záření, které vzniká v obalu atomu.

Záření gama – Vzniká v procesu rozpadu jader. Je označováno jako krátkovlnné fotonové záření vznikající zpravidla při přechodu atomového jádra z vyššího energetického stavu do nižšího (radioaktivní přeměna v radioizotopech).



Obr. 4–Stavba atomu [6]

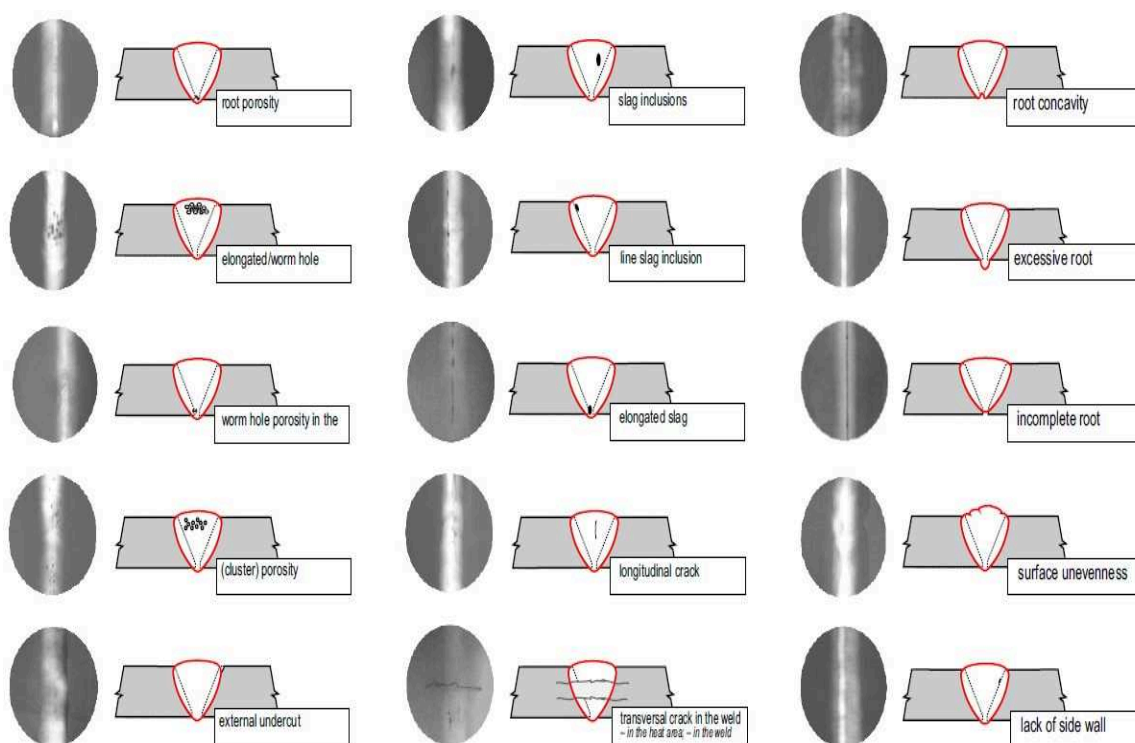
2.1.4 Vznik rentgenového (X) záření a gama záření

Ke vzniku rentgenového záření je zapotřebí zdroj elektronů, záření pro urychlení elektronů a terčik pro zastavení urychlených elektronů. Rentgenové záření vzniká, když katodou rentgenky emitované elektrony ztratí část své energie v oblasti atomů wolframového terčíku anody rentgenky. Tato část energie je přitom vyzářena jako záření X a je tím větší, čím je větší dopadová rychlost elektronů.

Na rozdíl od záření X, které vzniká výměnným energetickým procesem mezi urychlenými elektrony a atomy terčíku, vzniká gama záření jako několik ostře energeticky definovaných jaderných procesů. Záření gama je většinou větší než záření X a má proto jiné radiografické účinky.

2.1.5 Způsoby prozařování

Z hlediska principu prozařování mohou nastat pouze tyto základní situace expozičního upořádání: expozice centrická, excentrická, expozice přes dvě stěny s vyhodnocením pouze jedné stěny a vyhodnocením obou stěn. Obvykle se v předpisech pro prozařování uvádí 7 způsobů uspořádání. Toto uspořádání se dá aplikovat v praxi jak pro svarové spoje (viz Obr.5), tak i pro odlitky.



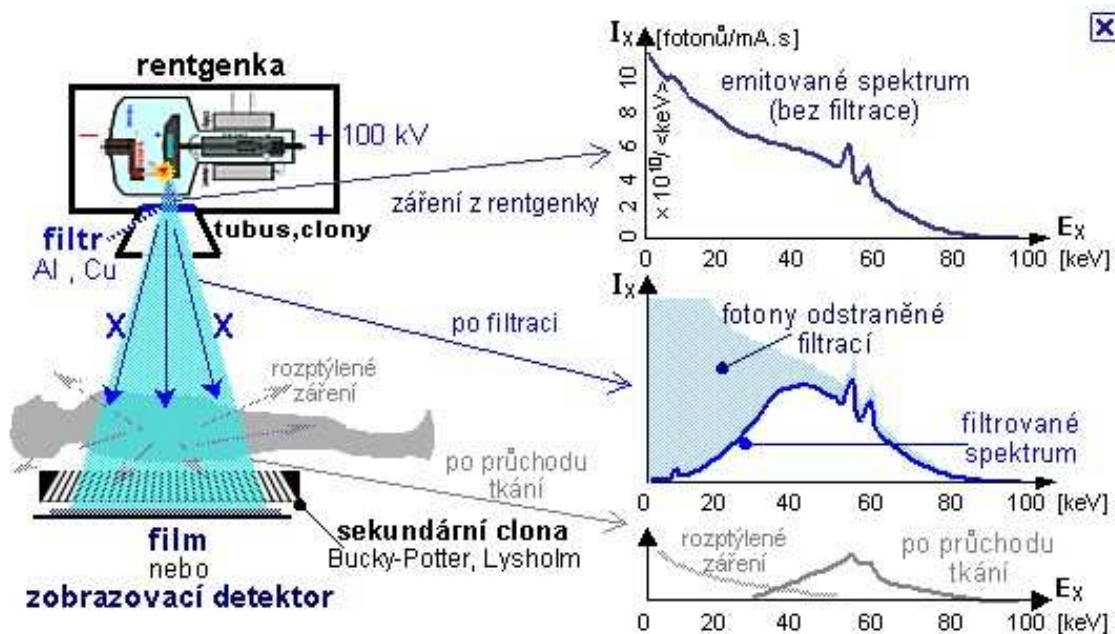
Obr. 5 – Ukázka svarů při rentgenovém záření [6]

Než se rentgenové paprsky dostanou od okamžiku vzniku až k prozařovanému materiálu, musí projít různými filtry, ve kterých dojde k jejich tlumení či zeslabování. Na Obr. 6 je zjevné, jak probíhá filtrace rentgenového záření. Cílem filtrace je snížit počet nízkenergetických fotonů ve svazku.

Filtraci rozdělujeme do tří skupin: „Základní filtrace“

„Přídavná filtrace“

„Celková filtrace“



Obr. 6 – Filtrace rentgenového záření [6]

2.2 Metoda vířivých proudů (ET –Eddy CurrentTesting)

Tato kapitola byla zpracována dle literatury [6,7,9,10]

2.2.1 Historie

Tato metoda byla objevena již v první polovině 19. století jistým Francouzem *Dominiguem Arago*. ET má také své počátky v objevu elektromagnetické indukce v roce 1831. Po roce 1937 začal vývoj vysoce citlivých měřících přístrojů magnetického pole. V 50. letech 20. století bylo na družici nainstalováno první zařízení pro měření magnetického pole. S tímto zařízením bylo také zkoumáno magnetické pole Venuše. Další měřící zařízení následovala v mnoha vesmírných projektech.

2.2.2 Úvod do měření vířivými proudy

Základ ET – v anglickém jazyce Eddy Current Method, souvisí s objevem elektromagnetické indukce v roce 1831. Tehdy se zjistilo, že při změnách magnetického pole dochází ve vodičích, nacházejících se v tomto poli, k indukci elektrického napětí.

Toto napětí se může indikovat jak v elektrickém vodiči, tak v jakémkoliv elektricky vodivém prostředí, které se vyskytuje v působnosti měnícího se magnetického pole.

Jedná-li se o celistvý elektricky vodivý předmět nebo těleso, pak se z pravidla v rovinách kolmých na vektor magnetické indukce indukují proudy, které pojmenováváme podle jejich tvaru, např. pokud připomínají vodní vír, jsou to vířivé proudy. O existenci tohoto jevu byla poprvé napsaná zmínka již v roce 1830.

2.2.3 Princip vířivých proudů

Vířivé proudy se indukují ve zkoušeném materiálu za pomoci střídavého pole snímače (viz Obr. 7a). Podle **Lenzova zákona** – který popisuje vztah mezi elektrickým proudem a změnou magnetického indukčního toku, pole vířivých proudů ovlivňuje působení proti poli původnímu. Výsledné pole je tak dáno vektorovým součtem obou polí. Koncový bod konečného vektoru je ukázán ve fázové rovině na displeji použitého přístroje.

Trhlina, která vznikla na povrchu předmětu a je umístěna kolmo k toku vířivých proudů, má největší vliv na výsledné pole (viz Obr. 7b). Ve fázové rovině, která se zobrazí na displeji měřícího přístroje, je koncový bod výsledného vektoru maximálně vzdálen od počátku souřadnic.

Trhlina na povrchu, která je naopak rovnoběžně k toku vířivých proudů, nemá žádný vliv na přirozený odpor prostředí a tím způsobuje, že budící pole cívky nevykazuje žádné ztráty. Ve fázové rovině, která se zobrazí na displeji měřícího přístroje, je koncový bod výsledného vektoru minimálně vzdálen od počátku souřadnic.

Na povrchu předmětu je hustota vířivých proudů největší a klesá exponenciálně s hloubkou. Při rozdílném kmitočtu budícího pole snímače budou pronikat vířivé proudy do rozdílných hloubek (viz Obr. 7c).

Hloubka vniku σ [m] elektromagnetického pole do materiálu, který je vodivý, lze definovat vztahem (1):

$$\sigma = \sqrt{2/\gamma \cdot \mu \cdot \omega} \quad (1)$$

kde : μ permeabilita materiálu [m]

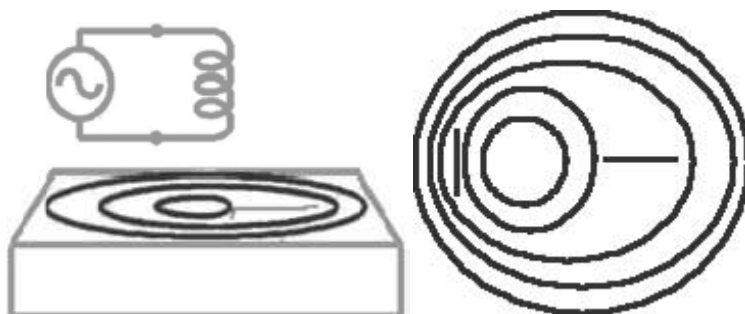
$f_s = \omega / (2 \cdot \pi)$ frekvence snímače [Hz]

γ vodivost [$\text{MS} \cdot \text{m}^{-1}$] (konduktivita materiálu) $\gg \omega \cdot \epsilon$

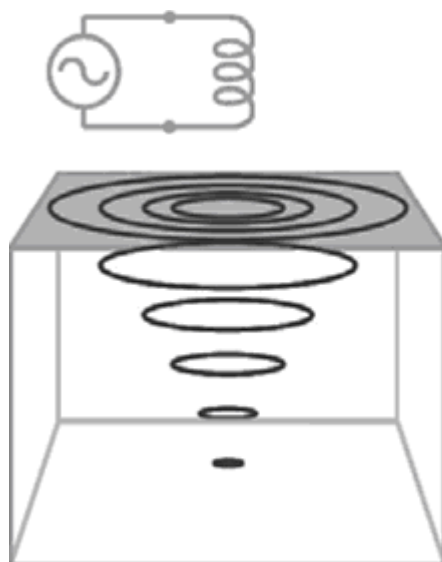
ϵ permitivita prostředí [$\text{F} \cdot \text{m}^{-1}$]

(Pozn.: Permeabilita udává míru magnetizace v důsledku působícího magnetického pole. Permitivita popisuje vztah mezi vektory intenzity elektrického pole a elektrické indukce v materiálu nebo vakuu.)

Pro odhalení skrytých povrchových vad musí být frekvence, která je budící, co možná nejvyšší, aby bylo dosaženo maximálního rozlišení vad. Nižší frekvence se aplikuje pro zjišťování vad, které jsou uvnitř materiálu a to z toho důvodu, aby byl vnik co nejhlubší. Nevýhodou však je, že vady budou méně rozlišitelné. Nižší frekvence se používá pro zjišťování vad u feromagnetických a u vysoce vodivých materiálů, aby bylo možné dosáhnout potřebné hloubky vniku.



Obr. 7 a – Střídavé pole snímače[12] Obr. 7b– Výsledné pole[12]



Obr. 7c– Pronikání vířivých proudů do rozdílných hloubek[12]

2.2.4 Využití metody vířivých proudů

Tato metoda se využívá pro detekci materiálových diskontinuit – nespojitostí, např. trhlin, povrchových prasklin, přeložek, poruch svarů apod. Dále na měření tloušťky stěn, měření naplátování feromagnetických i neferomagnetických vrstev na kovovém i nekovovém podkladu. Lze ji využít při kontrole povrchových vrstev kovů, jako je např. oduhličení, nitridace. Používá se při stanovení tloušťky laků, při kontrole strukturálního stavu kovů, při tepelném zpracování, také při kontrole záměn materiálu a kontrole mechanického namáhání, jako kontrola lopatek proudových motorů a turbín.

Výhody této metody jsou: relativně levná kontrola vůči některým jiným metodám, např. prozařování, možnost realizovat lehké přenosné přístroje pro nedestruktivní kontrolu, aplikovatelnost automatizace kontrolního procesu. Není potřeba před kontrolou speciálně upravovat povrch. Jedná se o bezkontaktní metodu. Díky této metodě lze měřit i při velmi vysokých teplotách.

Jako všechny metody, má i tato metoda své nevýhody: nemožnost indikace vad hluboko pod povrchem a má značnou citlivost na rozměry součásti, okrajový defekt.

2.2.5 Aplikace metody vířivých proudů ve strojírenství

Ve strojírenském odvětví nacházíme nespočet příležitostí k použití nedestruktivní diagnostiky, např. v automobilovém průmyslu, ve výrobě kuličkových ložisek, ve výrobě potravinářských a chemických zařízení, v transportní technice atd.

Všude, kde požadujeme 100% kontrolu velkého počtu výrobků, využijeme metodu vířivými proudy. Svě opodstatnění najde i tam, kde praktikujeme automatizaci kontrolního procesu z ekonomických důvodů. Díky automatizaci je zaručena a zabezpečena vysoká opakovatelnost výsledků kontroly, minimalizace vlivu zavinění lidskou chybou a menší náročnost na personální vybavení.

Nedestruktivní metodou můžeme prověřit hned několik oblastí – necelistvost tipu trhlin, strukturální stav materiálu ovlivněný tepelným zpracováním (např. kalení, popouštění, žíhání), chemické složení, vnitřní pnutí.

2.3 Zkoušky ultrazvukem (UT – Ultrasonic Testing)

Tato kapitola byla zpracována dle literatury [6,7,10]

2.3.1 Historie

Existence zvukových vln, které lidské ucho nemá schopnost slyšet, je známá již mnoho let. V roce 1794 zveřejnil italský vědec *Lazzaro Spallanzani* ve své knize „*Opuscoli di fisica*“ teorii, ve které se zmiňuje a zároveň popisuje schopnost netopýrů létat v kostelních věžích za tmy, aniž by narazili na jakoukoliv překážku. Uvedl, že je to proto, že tato schopnost nezávisí na zraku, nýbrž na využití tenkrát neznámých a nijak nepopsaných zvukových vibrací, které lidské ucho neslyší.

Další důležitý krok učinil v roce 1880 *Francis Galton*, který vynalezl a zkonstruoval vysokofrekvenční píšťalku, tzv. Galtonovu píšťalku, která měla zvukovou frekvenci 40 kHz. Její zvuk registrovali psi, ale člověk ji neslyšel.

Díky těmto poznatkům byl v roce 1881 položen základ pro konstrukci přístrojů, které vytvářely a registrovaly vysoké ultrazvukové frekvence.

2.3.2 Úvod ke zkoušení ultrazvukem

Při zkoušce ultrazvukem je hlavním cílem zjistit skryté vnitřní vady rozměrných výkovků a vývalků, které se nedají vhodně prozářit. Tyto vady mohou vést k havárii již hotového výrobku anebo přinejmenším jsou zjištěny až při konečném třískovém obrábění.

Metoda ultrazvukové defektoskopie je vlastně metoda založená na změnách propustnosti a odrazivosti ultrazvukové vlny vlivem nečistoty materiálu. Ultrazvuk, stejně jako zvuk či hluk, je mechanické kmitání částic kolem rovnovážné polohy šířící se v pružném prostředí.

Frekvenční rozsah u ultrazvukových kmitů je mimo slyšitelné spektrum, tzn. více než 20kHz. Pro defektoskopické účely se běžně používají rozsahy 100kHz až 50MHz, mimořádně až do 200MHz.

2.3.3 Základní pojmy

Ultrazvuk můžeme chápat jako zvukové vlny o jisté frekvenci, které jsou nad mezí slyšitelnosti. Vlny se šíří prostředím, jenž musí být alespoň z části elastické. Toto vlnění není nic jiného než kmitavý pohyb částic prostředím okolo jejich rovnovážných poloh.

Ikdyž mezi částicemi účinkují souhlasné (souběžné) síly, přesto se tento pohyb přenáší z jedné částice na všechny ostatní. Tento jev se navenek projeví tak, že vzruch – vlna se pohybuje určitou rychlostí v prostředí.

Z matematického hlediska se tento pohyb dá vyjádřit tzv. vlnovou rovnicí (2), která má tento tvar:

$$a(t) = A_0 \cdot \sin \omega \cdot [t - (x/c)] \quad (2)$$

kde: $a(t)$ je výchylka částic z rovnovážné polohy v čase t [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

A_0 je maximální výchylka částice, čili amplituda [m]

ω je kruhová frekvence $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$]

f frekvence $f = 1/T$, kde T je perioda, za kterou se děj opakuje [Hz]

x vzdálenost kmitajícího bodu od počátku [m]

c rychlost šíření vlny [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

Akustický tlak, který je vyvolaný vlněním v prostředí, je závislý na rychlosti kmitání částic a na vlnovémoporu prostředí.

Tyto stavy se dají popsat následujícími rovnicemi (3),(4):

$$p = z \cdot v \quad (3)$$

$$z = \rho \cdot c \quad (4)$$

kde: p je akustický tlak [Pa]

v je rychlost kmitání částic okolo rovnovážné polohy [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

z je akustická impedance prostředí [$\text{Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$]

ρ je měrná hmotnost prostředí [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

Vlnění se v prostředí šíří určitou rychlostí a za čas, který odpovídá periodě T , projde dráhu λ . Přestože T je čas, jenž vyjadřuje periodické opakování velikosti výchylky kmitání částic, tak v určitém prostředí budou částice, které se nacházejí ve stejné fázi kmitavého pohybu, vzdálené o násobky λ .

λ je vlnová délka, kterou označujeme vzdálenost dvou sousedních bodů kmitajících ve stejné fázi, měřené ve směru šíření vlnění. Proto platí vzorec (5):

$$\lambda = c/f \quad (5)$$

kde: λ je vlnová délka [m]

f je frekvence [Hz]

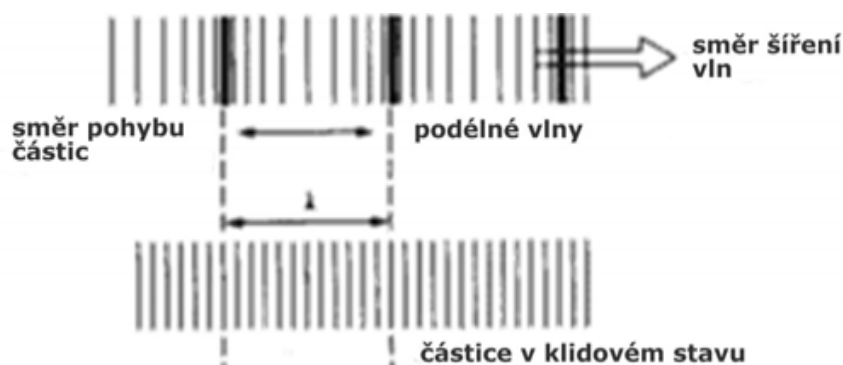
2.3.4 Druhy ultrazvukových vln

Zvukové vlny, jenž jsou v pevných látkách, se mohou šířit ve čtyřech základních režimech, které jsou založeny na způsobu, jakým částice kmitají. Zvuk se může šířit jako podélné vlny, příčné vlny, povrchové (Rayleighovy) vlny a v tenkých materiálech jako vlny deskové.

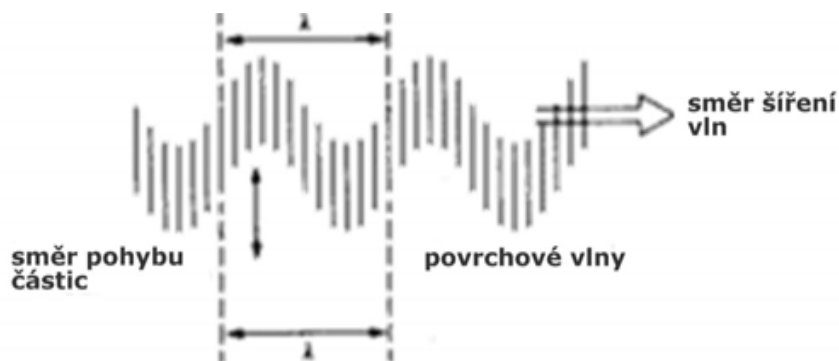
Šíření zvuku se dá rozdělit na podélné a příčné vlny, které se nejčastěji používají v ultrazvukové kontrole. Částicový pohyb je zodpovědný za šíření podélných a příčných vln (viz Obr. 8).

V podélných vlnách se kmitání vyskytuje v podélném směru nebo ve směru ve kterém se šíří vlny. Tyto vlny se mohou nazývat tlakové, pokud jsou v těchto vlnách aktivní tlakové a detekční síly. Mohou být vytvořeny v pevných i kapalných látkách, jelikož energie, která prochází skrz strukturu atomů v řadách, má srovnaný nebo roztažený pohyb. Podle kolísání hustoty částic a jejich pohybu se mohou vlny také nazývat hustotní. Rychlost šíření ultrazvukové vlny je funkcí vlastností prostředí, tzn. modulu pružnosti v tahu a ve smyku, hustoty, Poissonova čísla a adiabatické stlačitelnosti.

Jakmile dopadne vlna kolmo na rozhraní dvou prostředí, dochází k odrazu vlny. Na rozhraní definujeme koeficient odrazu R jako poloměr odraženého akustického tlaku a dopadajícího akustického tlaku. Koeficient průchodu D je definován jako poměr prošlého akustického tlaku a tlaku dopadajícího.



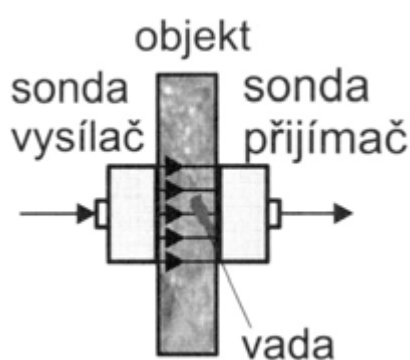
Obr. 8 – Podélné šíření ultrazvukových vln [13]



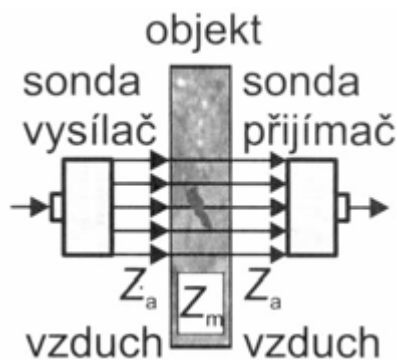
Obr.8 –Příčné šíření ultrazvukových vln [13]

2.3.5 Metody ultrazvukové defektoskopie

V podstatě existují dvě metody na zjišťování chyb materiálu ultrazvukem. Ta první je založená na zeslabení ultrazvuku při průchodu místem s materiálovou chybou. Je to tzv. přechodová (průchodová) metoda. Je buď spojitá nebo impulsová– (viz Obr. 9a,b). K této metodě je zapotřebí dvou sond, které jsou umístěny proti sobě tak, že jedna jen vysílá vlnění a druhá jen přijímá jeho část prošlou materiálem. Ovšem tento způsob zkoušení chyb v materiálu je omezen pouze na součástky, které mají vhodný protilehlý povrch. Další nevýhodou je fakt, že pokud se chyba nachází daleko od přijímací sondy a její průřez je menší než jaký má ultrazvukový svazek, potom následkem ohybu vlnění se v určité vzdálenosti, za již zmíněnou chybou, utvoří jakýsi akustický stín a díky němu přijímací sonda zaznamená stejný signál jako v místě, které je bez vady (chyby).



Obr. 9a – Kontaktní vazba [14]



Obr. 9b –Bezkontaktní vazba [14]

Ovšem každá diagnostika má své nevýhody i výhody. Výhodou této je, že ultrazvuk, v porovnání s odrazovou metodou, prochází jen poloviční dráhu a ta se méně zeslabuje. Z tohoto hlediska se přechodová metoda aplikuje tam, kde se zkouší těžko prozvučitelné materiály, jako je např. guma (pláště pneumatik).

Na níže uvedených fotografiích můžeme vidět, jak se používá zkouška ultrazvukem v praxi (viz Obr. 10).



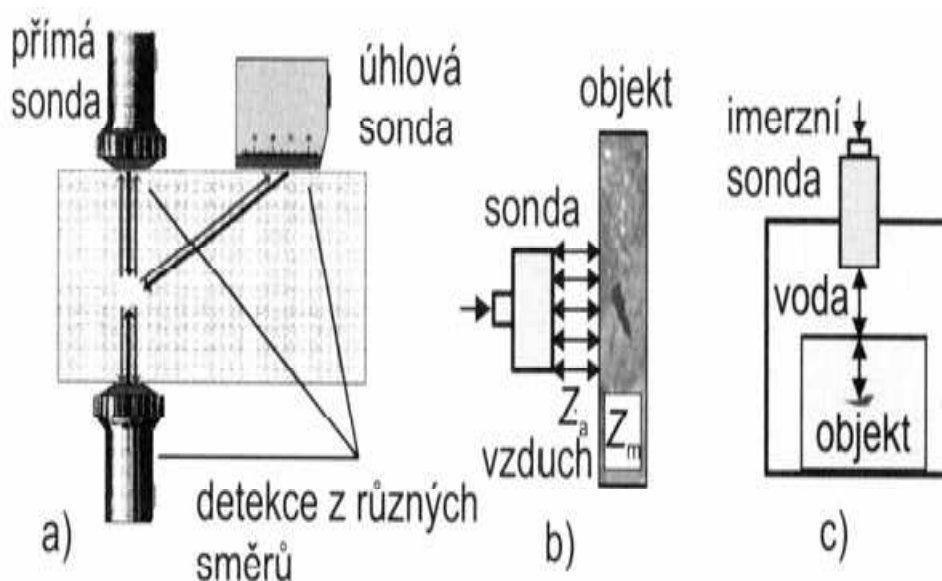
Obr. 10 – Zkouška svarových ploch parovodu ultrazvukem [16]

Na Obr. 11 je jasně vidět, jak se dá tato metody využít při kontrole jakosti válcovaných plechů.



Obr. 11 – Kontrola jakosti válcovaných plechů [16]

Druhá metoda – odrazová (viz Obr. 12) je založena na získání odrazů-ech, která jsou způsobena chybami materiálu. Na příjem ech se zpravidla, ale ne vždy, využívá ten stejný měnič, kterým se ultrazvuk do materiálu i vysílá. Na zkoušení je tedy zapotřebí pouze jeden volný povrch. Z doby příchodu echa po vyslání ultrazvukového impulsu se určuje dráha. Jestliže je známa technologie výroby, je možno v určité míře rovnou i určit, o jakou chybu se jedná. Nevýhodou je, že ultrazvuk musí překonat dvojnásobnou dráhu, kterou je vzdálenost k chybě a dále existenci tzv. mrtvého pásma. Toto pásmo omezuje zjišťování chyb při zkoušení povrchu. Proto tuto metodu nepoužíváme na zkoušení tenkých plechů. Pro lepší zjištění chyb v blízkosti zkoušeného povrchu materiálu odrazovou metodou se dá dosáhnout pomocí dvojité sondy.



Obr. 12 – a) kontaktní vazba b) vzduchová vazba c) bezkontaktní vazba [14]

2.3.6 Ultrazvukové přístroje

Veškeré přístroje, které slouží pro ultrazvukovou defektoskopii, tzv. univerzální ultrazvukové defektoskopy, jsou ke zjišťování chyb jak pro odrazovou, tak pro přechodovou metodu. Některé přístroje současné koncepce jsou schopny zachytit údaje o časovém průběhu signálu stejně jako údaje o tloušťce. Možnost zachytit údaje o časovém průběhu signálu umožňuje operátorovi, aby si mohl prohlédnout A –scan (zobrazení amplitudy odražených signálů na časové ose) dlouho po ukončení kontroly.

Přístroje jsou dnes rovněž schopny upravit měření dle povrchových podmínek materiálu. Toto vede k mnohem přesnějším a opakovatelným měřením v terénu. Mnoho ultrazvukových detektorů vada má trigonometrickou funkci, která umožňuje rychlou a přesnou lokalizaci vad při využití kontrol příčnými vlnami.

CRT obrazovky byly z větší části nahrazeny LED nebo LCD monitory. S těmito monitory lze, ve většině případů, pracovat za jakéhokoliv okolního světla (viz Obr. 13). Ultrazvuková kontrola je také v široké míře automatizována. Počítače, řízení pohybu a robotika přispěli k rozvoji kontroly ultrazvukem. Kontrola velkých komponent složitých tvarů, s jedním nebo několika přijímači je plně řízena počítačem. Některé přístroje jsou určeny k měření tloušťky stěn materiálu (viz Obr. 14).



Obr. 13 – Ultrazvukový přístroj USM 35 [15]



Obr. 14 – Měření tloušťky stěn – EMAT systém [16]

3 ZKOUŠENÍ KAPILÁRNÍ METODOU (PT–PenetrantTesting)

Tato kapitola byla zpracována dle literatury [6,7,9]

3.1 ČSN EN 571-1 Nedestruktivní zkoušení – Kapilární zkouška

Tato norma představuje sérii evropských norem pro PT zkoušku, která obsahuje:

EN 571– 1 PT část 1: Obecné zásady

EN 571– 2 PT část 2: Kontrola kapilárních prostředků

EN 571– 3 PT část 3: Kontrolní měrky

„Tato norma stanoví zkoušení PT používanou pro zjišťování otevřených povrchových vad na zkoušeném povrchu jakou jsou trhliny, přeložky, drážky, póry a studené spoje. Používá se především u kovových materiálů, ale může být použita i u jiných materiálů za předpokladu, že tyto materiály nejsou rozrušovány zkušebními prostředky a nejsou extrémně porézní. Příkladem materiálů, které lze zkoušet jsou odlitky, výkovky, svarové spoje, keramika apod.“ (Citace dle normy ČSN EN 571–1)

3.2 Princip kapilární metody

Tuto zkoušku– metoda barevné indikace, jsem prováděla v laboratořích ve firmě PTS Josef Solnař s.r.o. Metoda barevné indikace je méně citlivá než metoda fluorescenční. Z tohoto důvodu se nepoužívá v letectví a není vhodná na zjišťování únavových trhlin.

PT zkouška je nedestruktivní kontrola, která indikuje přerušení materiálu (diskontinuity), jenž komunikují s povrchem. Diskontinuity jsou otevřené na povrchu materiálu. Nejvhodnější jsou pomocné –kapalné látky a mají tu vlastnost, že smáčí povrch a vnikají do mezer a do dutin. Tuto vlastnost využíváme k tomu, aby se zviditelnily velice úzké a malé, pro lidské oko nespátřitelné, trhliny na povrchu materiálu. Pokud se tyto kapalné látky obarví a „vystoupí“ z těchto mezer zpátky ven prostřednictvím tzv. pijákového efektu, pak se místa, kde leží trhliny, zviditelní na povrchu zkoušené součásti. Kapilární metoda je pro své relativně nízké náklady a poměrně snadnou proveditelnost ekonomicky výhodná a stále častěji používaná k prokazatelnosti kvality výroby (vyloučením vadných výrobků z procesu a detekci provozních vad z důvodu zamezení selhání výrobku během provozu – v letectví). Kdyby se toto vyhodnocení podceňovalo, nebyla by zaručena kvalita výrobků ani bezpečnost uživatelů.

Celá zkouška lze provést také v univerzální penetrační kabině (viz Obr. 15).



Obr. 15 – Univerzální penetrační kabina [17]

Pro velkosériovou kontrolu v letectví, automobilovém průmyslu a strojírenství se používají penetrační linky (viz Obr. 16). Mohou být automatické či poloautomatické, s ekologickým provozem a plnou recyklací oplachové vody.



Obr. 16 – Penetrační linky [17]

3.3 Pomůcky a zkušební prostředky pro PT

K tomu, abych mohla provést metodu barevné indikace, je zapotřebí mít: čisticí prostředek, penetrant a vývojku (viz Obr. 17).

Čističe– Jsou prostředky, které slouží k chemickému očištění zkoušených povrchu před zkouškou.

Penetrant– Nanáší se na vyčištěný povrch, proniká do povrchových vad a na konci zkoušky vytváří indikace (zobrazení) vad. Jdou buď barevné (červené) nebo fluorescenční.

Smývyče– (mezičistič), slouží k odstranění přebytku penetrantu z povrchu zkoušeného dílu po uplynutí penetračního času.

Vývojky– Nanášejí se na zkoušený povrch po odstranění přebytku penetrantu. Po usušení vytváří na zkoušeném povrchu bílý porézní povlak, do kterého vzlíná penetrant z vad a vytváří indikace. Vývojka zároveň tvoří kontrastní pozadí pro indikace.

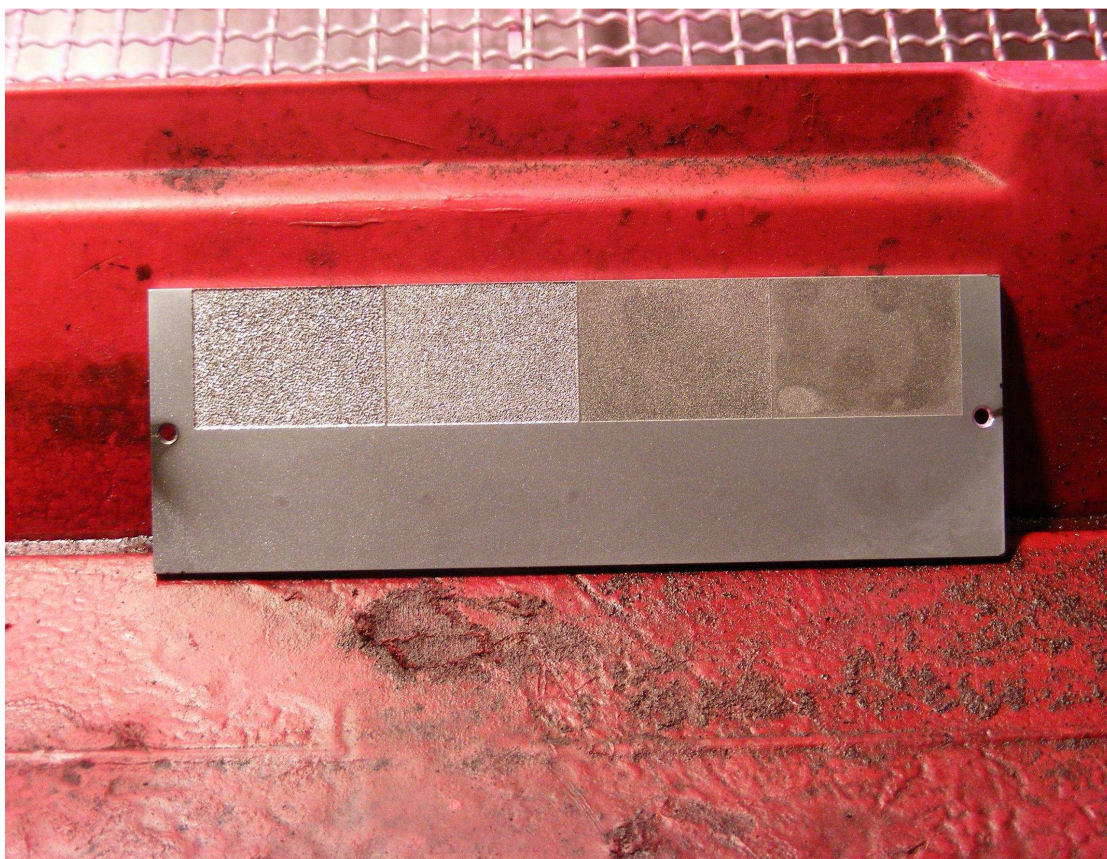
Je vhodné, aby všechny tyto prostředky byly od stejného dodavatele. Na obale musí být vždy zapsán výrobce a označení penetrantu, např. PFINDER 800, 409 128. Všechny informace o prostředcích, které jsem použila u PT, jsem zaznamenala do protokolu (viz příloha 1).

Před samotnou zkouškou jsem ke zjištění, zda zkušební systém odpovídá požadavkům, potřebovala použít hliníkovou měrku –kontrolní měrka 1 nebo ocelová pochromovaná destička s vtisky od kulové plochy – kontrolní měrka 2 (viz Obr. 18).

Kontrolní měrka 2 by se měla použít nejen na začátku pracovní směny, ale pokaždé, když používaný zkušební systém vykazuje neočekávané vlastnosti. Po každé provedené kontrole se měrka dokonale očistí od všech zbytků penetrantu, vývojky a jiných látek, které ovlivní reprodukovatelnost výsledků. Toho se docílí dlouhodobým máčením ve vhodném rozpouštědle nebo v ultrazvukové pračce. Nelze použít měrku, která není vhodně očištěná.



Obr. 17 – Čistič, barevný penetrant, mokrá vývojka na bázi těžké suspenze



Obr. 18 –Kontrolní měrka 2

Jakmile jsem kontrolní měрку očistila a byla vhodná pro kontrolu zkušebního systému, nanesla jsem na její povrch penetrant. Musela jsem ji nanést rovnoměrně a v tenké vrstvě, jinak by mohlo dojít k nesprávnému provedení a vyhodnocení kontroly. Po uplynutí penetračního času (cca 15min), jsem odstranila přebytečný penetrant z měrky pomocí čističe tak, aby pozadí měrky bylo čisté a penetrant zůstal v kontrolních vadách. Nakonec jsem nanesla vývojku v rovnoměrné a tenké vrstvě (příliš silná vrstva vývojky nedovolí penetrantu proniknout vývojkou a zobrazit se, příliš slabá vrstva vývojky nezobrazí vady v jejich skutečné velikosti – obojí může způsobit neadekvátní vyhodnocení celého procesu a následné špatné kontroly výrobků).

Poté se musí na kontrolní měrce, která má na povrchu 5 vtisků od kulové plochy, zobrazit alespoň 4 z 5 vtisků. Pokud se zobrazí méně než 4, zkušební systém není vhodný pro použití k penetrační zkoušce. Po prohlídce jsem zjistila, že se na zkušební měrce zobrazily 4 vtisky (viz Obr. 19), což znamenalo, že zkušební systém při samotné zkoušce bude v pořádku.



Obr. 19 – Kontrola zkušebního systému provedená na kontrolní měrce

Je zde vidět, jak má vypadat kontrolní měrka po použití zkušebního systému, jenž by měl být použit na provedení PT. Na první pohled je patrné, že z 5 výtisků se zobrazily 4, což znamená, že zkušební systém jsem mohla použít pro následující zkoušku.

V následující tabulce je uvedeno mnoho technik, které uvádí kombinaci různých typů penetrantů, čistících prostředků a vývojek (viz Obr. 20).

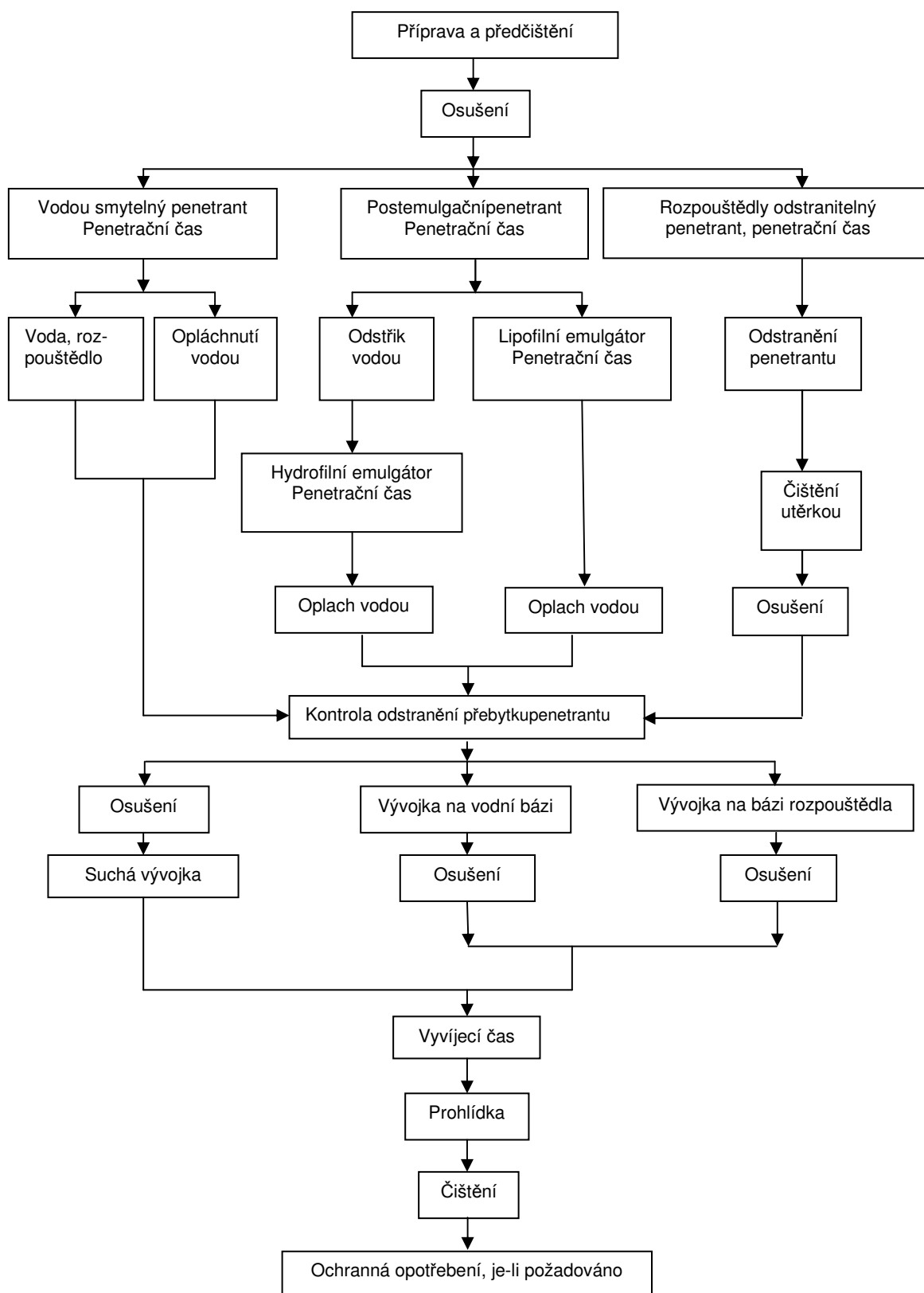
Obr. 20 Kombinace penetrantu, čistících prostředků a vývojek

Penetrant		Prostředek k odstranění penetrantu		Vývojka	
TYP	Název	Metoda	Název	Druh	Název
I	Fluorescenční	A	Voda	a	Suchá
II	Barevný	B	Lipofilní emulgátor: 1. Na olejové bázi 2. Oplach tekoucí vodou	b c	Vodou rozpustná Suspendní na vodní bázi
III	Dvouúčelový (fluorescenční i barevný) penetrant	C D E	Rozpouštědlo (tekuté) Hydrofilní emulgátor 1. Volitelný předoplach (voda) 2. Emulgátor (vodou rozpustný) 3. Konečné opláchnutí (voda) Voda a rozpouštědlo	d e	Na bázi rozpouštědla Na vodní bázi nebo na bázi rozpouštědla pro zvláštní užití (např. smívatelná vývojka)

(Pozn. Ve zvláštních případech je nutné použít penetrační prostředek s ohledem na hořlavost, obsah síry, halogenů a sodíku a ostatních nečistot.)

3.4 Jednotlivé kroky metody a zkušební systém

Jakoukoliv plochu, která má být kontrolována PT je nutno připravit tak, aby na povrchu zkoušeného předmětu byly odstraněny veškeré rušivé nečistoty. Na očištěnou a připravenou plochu se nanese penetrační prostředek nebo-lipenetrant a nechá se působit dostatečně dlouhou dobu, aby mohl zaplnit co možná nejlépe případné materiálové přerušení – trhliny. Po uplynutí penetrační doby se nadbytečná vrstva penetrantu na povrchu odstraní tak, aby penetrační tekutina zůstala v případných trhlínách, ale zároveň aby byla požadovaná plocha zvenčí čistá. Na metodickém postupu (viz Obr. 21) je možno vidět, v jakých krocích by měla zkouška probíhat.



Obr. 21 – Znázorněné schéma postupu při kapilární zkoušce

V následujícím kroku se pomocí vývojky penetrant „zviditelní“ – vytáhne ven. Vývojka funguje jako piják. Poté následuje prohlídka – inspekce pouhým okem pověřeným pracovníkem. Tato prohlídka umožní spatřit dvojrozměrné zvětšené zobrazení trhliny na pozadí bílé vývojky. Jako poslední krok se provede očištění zkoušené plochy.

Každá PT probíhá v následujících krocích:

- a) Příprava a předčištění
- b) Penetrace – nanesení penetrantu
- c) Mezičištění – odstranění přebytku penetrantu
- d) Vyvolávání – nanesení vývojky
- e) Inspekce – inspekce
- f) Vypracování zápisu
- g) Konečné čištění

Výrobci zpravidla nezahrnují do penetračního systému čistič.

Zkušební systém tedy tvoří: –Penetrant

– Mezičistič

– Vývojka

Aby byl účinek zřejmý, musí být tyto materiály od výrobce vůči sobě přizpůsobeny. Proto se doporučuje, aby byly materiály od stejného výrobce a používaly se v kombinaci, jakou uvádí výrobce.

3.4.1 Příprava a předčištění zkušební plochy –teoretická část

Jako každá zkouška, tak i PT má svá omezení. Pokud nebude materiálové přerušení komunikovat s povrchem, penetrant tam nemůže vniknout a nedojde ani k vytvoření indikace. Na rozdíl od jiných povrchových metod, jako je magnetická prášková metoda (MT–MagneticParticleTesting) anebo metoda vířivých proudů (ET–Eddy CurrentTesting), lze PT používat z pravidla na jakémkoli dílu, bez ohledu na materiál. PT se používá hlavně na metalické (kovové) materiály, ale lze zkoušet i nemetalické (nekovové) předměty. Ovšem u umělých hmot se musí počítat s jistým omezením. Jelikož některé umělé hmoty, jako

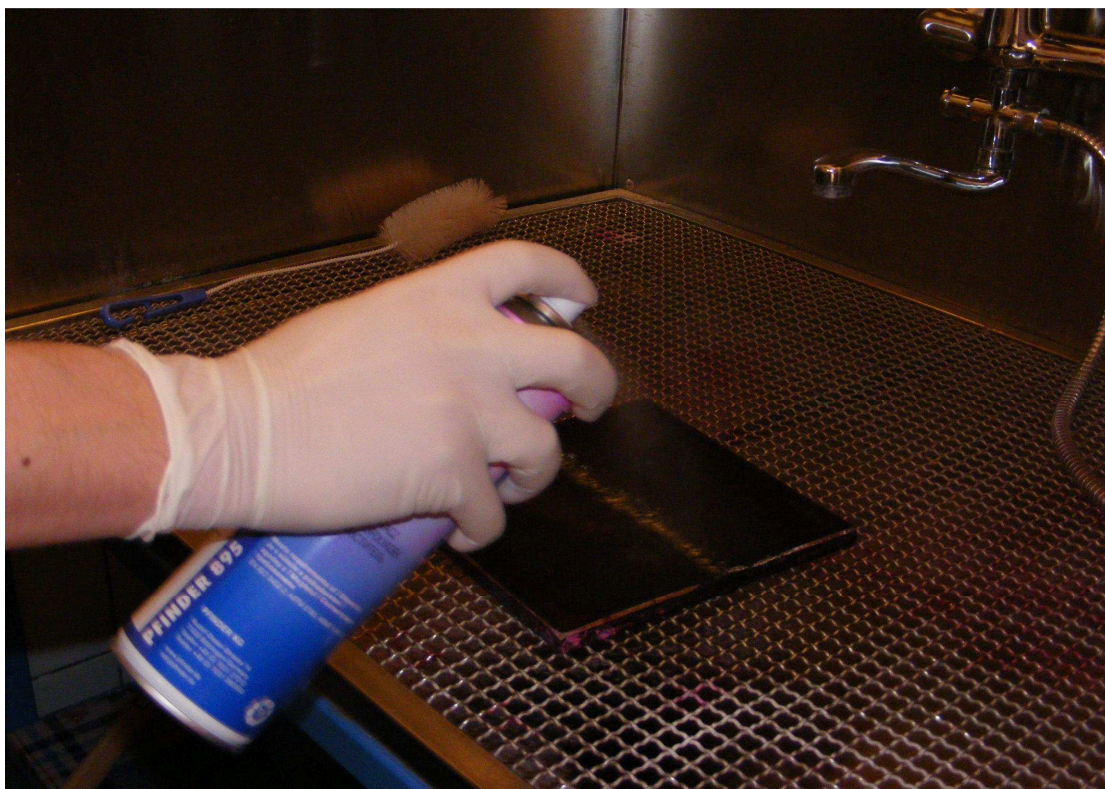
jsou plasty, mohou reagovat s ředidlem v suspenzi vývojky nebo s čistícím prostředkem. Pokud budou nějaké pochybnosti, musí se před samotným zkoušením použít test tzv. kompatibility – to znamená, že se plasty musí navzájem snášet s ředidlem a s čistícími prostředky. Slinuté kovy a neglazovaná keramika (porézní materiály) se PT metodou

nezkouší, jelikož se objeví na povrchu nespočet indikací z přirozených „pórů“, která budou překrývat indikaci hledaných trhlin.

3.4.2 Příprava a předčištění – praktická část

Abych vytvořila co možná nejčistší povrch zkoušené součásti, nanasla jsem ve vzdálenost cca 15÷20cm od povrchu čisticíprostředek (viz Obr. 22). Pokud by se na povrchu vyskytovaly okuje, rez nebo různé nátěry, muselo by se předčištění provést mechanickou nebo chemickou cestou, případně jejich kombinací (u mého zkoušení nebylo zapotřebí použít). Poté jsem čistým a suchým hadříkem dokonale setřela povrch materiálu (viz Obr. 23), aby čistič, který zůstal v nespojitostech, nebránil pronikání penetrantu. Setřením jsem tak odstranila rozpuštěnou mastnotu, olej či prach z povrchu materiálu. V jiných případech, pokud bych nemohla použít hadřík, by se zkoušené kusy ponořily do lázně s rozpouštědlem na tak dlouhou dobu, dokud by se nečistoty na povrchu nerozpustily. Za předpokladu, že by se mi zdála plocha stále nevhodná k nanesení penetrantu, postup bych opakovala až do té doby, než by byl povrch čistý, protože zbylý prachy a nečistoty by mohly zabránit vniknutí penetrantu do případných trhlin (v mém případě bych povrch čistý a nebylo zapotřebí opakovat čištění).

Jak je na fotografiích vidět, je lepší tuto zkoušku provádět v ochranných rukavicích, jelikož vývojka je zbarvená do červena, může zůstat na pokožce a nejde smýt. U lidí, kteří mají citlivou pokožku, může ojediněle vzniknout vyrážka.



Obr. 22 – Nanášení čistícího prostředku



Obr. 23 – Čištění povrchu

3.4.3 Penetrace

Poté, co byl povrch očištěn od prachu a jiných nečistot, mohla jsem přejít k další části zkoušení a to nanášení penetrantu (viz Obr. 24).

Před samotným nanášením je zapotřebí penetrant ve spreji **důkladně protřepat**. Opět jsem ho nanášela ve vzdálenosti cca 15÷20cm od zkoušeného povrchu. Bylo zapotřebí, aby byl penetrant nanesen rovnoměrně. Z ekonomického hlediska by neměla být vrstva penetrantu příliš silná.

Poté probíhá tzv. penetrační čas. Je to čas od nanášení penetrační kapaliny až po odstranění jejího přebytku z povrchu zkoušeného výrobku. Při velmi krátké době se může stát, že neproniklo tolik penetrantu, aby se projevila následná nespojitost, ale na druhou stranu příliš dlouhá doba (1hod a více) by vlivem odpařování těkavých látek mohla razantně ovlivnit schopnost penetrace. Ideální penetrační doba je od 15÷45min.

Mezi penetrací a nanášením vývojky se musí provést mezičištění – odstranění přebytečného penetrantu, jinak bych nemohla nanést vývojku.



Obr. 24 – Nanášení penetrantu

3.4.4 Nanášení vývojky

Po uplynutí penetračního času jsem mohla přejít k poslední části zkoušky a to nanášení vývojky. Penetrační čas se dá urychlit – ohřátím penetrantu – což se obecně nedoporučuje

- ohřátím zkoušeného výrobku
- penetrací za sníženého tlaku
- vibracemi

Opět jsem musela vývojku řádně protřepat a nanášet v 15÷20cm od povrchu (viz Obr. 25). Poté, co jsem nanesla vývojku, penetrant z necelistvostí vzlíná do vrstvy vývojky a vytváří indikace vad, které se hodnotí vizuálně. Na fotografii (viz Obr. 26) je vidět, jak se dá urychlit zasychání mokré vývojky – urychlení vyvolávacího času. Mokrý nevodná vývojka, kterou jsem nanášela na zkušební vzorky, patří mezi lehce povrchové rozpouštědla, která se odpařují při teplotě místnosti (pár sekund) a není třeba další sušení. Penetrant ji ihned vysává z vad.

Vyvíjecí čas však začíná až po odpaření nosného média a ihned po vysušení mokré vývojky. Pokud bych vývojku nanesla nerovnoměrně a v tenké vrstvě anebo naopak v příliš vysoké tloušťce, penetrant by se nedostal až na povrch vývojky a vytvořily by se rozptýlené a zvětšené nespojitosti. Na druhou stranu pokud bych vývojku nanesla příliš řídce nebo jen na některá místa, vývojka by nemusela nebo dokonce nemohla projevit své sací schopnosti.



Obr. 25 – Nanášení vývojky



Obr. 26–Urychlení zasychání mokré vývojky

3.5 Oblasti aplikace a omezení při kapilární zkoušce

3.5.1 Význam přípravy zkušebního povrchu

Trhliny na povrchu zkoušeného materiálu budou při PT indikovatelný za předpokladu, že:

- Komunikují s povrchem (jsou otevřené na povrchu)
- Nejsou vyplněné nečistotami (jako jsou např. mastnota, olej, špína, voda) a nejsou překryty barevným nátěrem
- Zkoušená plocha nebo přilehlé oblasti nejsou v takovém stavu, že např. volné okraje dovolí vnikání penetrantu – to má za následek vzniku falešných indikací nebo zmenšení kontrastu
- Na povrchu nebudou žádné agresivní složky – kyseliny nebo chromáty, které by měly za následek zničení penetrantu v důsledku chemické reakce nebo by mohly zhoršit jeho účinnost

Aby se takové nebo podobné stavy na povrchu nemohly vyskytnout, jsou k dispozici následující techniky a způsoby, jak povrch zkoušeného předmětu, jeho plochy, připravit:

- a) Mechanické opracování
- b) Fyzikálně chemická příprava

3.5.2 Mechanická úprava

Ve většině případů jsou předměty ke zkoušce po jejich dohotovení pokryty okujemi, struskou, resp. provozované části strojů nebo jeho části mohou obsahovat rez nebo jiné nánosy. Je zřejmé, že v takovém stavu nemůže být takto postižená plocha zkoušená PT. Proto je nutné plochu zbavit jakýchkoli nánosů. Díly jsou při vlastní výrobě mechanicky obráběné a z tohoto hlediska se musí zařadit samotná zkouška až na konec mechanické operace. Pokud se v okamžiku zkoušky ale vyskytnou na ploše strusky nebo rez, je vhodné a rozumné plochu účelově kvůli PT mechanicky opracovat.

Mechanické opracování lze provést pomocí:

- Kartáče, brusného papíru a broušení
- Ultrazvukové čištění
- Obrobení s odstraňováním třísek
- Otryskání pískem nebo broky
- Ofoukání vzduchem
- Proudem tlakové vody

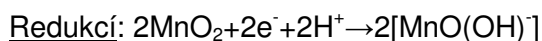
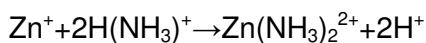
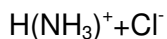
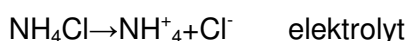
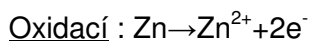
Kartáče a brusný (smirkový) papír jsou šetrné mechanické techniky, sloužící k odstranění nánosů volné rzi a okují a zároveň k zarovnání povrchu. Hrubé a nerovné povrchy mohou podstatně snížit zkušební citlivost tak, že jako nezbytný krok musíme provést i broušení.

Tyto techniky však nejsou schopny odstranit nánosy zevnitř necelistvostí samých. Jestliže jsou ale takové nečistoty velmi křehké, je možné použít **ultrazvukové čištění**, kdy se nečistoty z nespojitostí jakoby vysypou.

Při operaci, při které se odstraňuje tříska nebo při otryskávání, je zapotřebí dávat velký pozor na to, aby malé dutiny nebyly znečištěny a zamáčknuty a tím pádem se nestaly pro penetran nepřístupnými. Z těchto důvodů se otryskávání aplikuje pouze na tvárné materiály a to je velmi opatrně. Aby se dosáhlo dobrého stavu povrchu zkoušeného předmětu, je často ještě nutné provést odstranění stop po řezném nástroji. V takovém případě se musí správně zvolit nástroj pro opracování.

Dále je vhodná konečná úprava povrchu leptáním a tím se do určité míry trhliny opět rozevrou. Leptání se však provádí pouze za předpokladu, že se to výslovně vyžaduje a za přítomnosti speciálně vyškolených odborníků, jelikož tato operace obnáší speciální znalosti. Špatné provedení leptání má za následek trvalé poškození kvality povrchu.

Z chemického hlediska probíhá elektrochemická reakce:



3.5.3 Fyzikálně chemické předčištění

Zkušební plocha pro PT se připravuje čistě fyzikálními nebo chemickými prostředky.

A tady se používá:

- Čistící prostředek – čistič (ředidlo)
- Detergenty (chemicky účinné vodní roztoky)

Organická rozpouštědla (polární, nepolární) jako je aceton, alkohol, uhlovodík, se používají pro očištění zkušební plochy od mastnot, oleje, barvy a mají společné to, že lehce vypřchají a jsou chemicky netečné. Oleje, mastnota a barvy se musejí odstranit z důvodů, jako jsou:

- Mohou se mísit s penetrantem a měnit nepříznivě jeho vlastnost
- Mohou vyplňovat nespojitost, kam potom nemůže penetrant proniknout

Jelikož mastnota a olej se v průběhu času nevyhnutelně usazují na čistém povrchu zkoušeného předmětu, proto by měl povrch předmětu absolvovat alespoň jednu z výše uvedených čistících procedur. Ve většině případů se používají tzv. čističe ve sprejích. Cena těchto čističů (čistič, penetrant, vývojka – zkušební systém) se pohybuje okolo 600,- ÷ 800,- Kč. To ovšem znamená, že po předčištění musí nastat také proces osušení. Rozpouštědlo, které zůstalo v nespojitostech, by totiž zabránilo vniku penetrantu do trhlin nebo by jej mohlo zředit. Tento čistič se nanese na zkušební povrch a rozpuštěná mastnota, olej a barva se za pomoci čistého hadříku setře. V jiných případech (velmi rozměrné plochy) se zkoušené plochy ponoří do lázně s rozpouštědlem na tak dlouho dobu, dokud se nečistoty nerozpustí. Ve velmi kritických případech, kdy je povrch velmi zanesen, se lázeň nahřeje a malé díly se připevní buď na háky, popřípadě držáky a zavěsí se do páry ředidla (tzv. odmašťování párou) anebo se uloží do košíků nad lázeň. Tento postup má svou výhodu,

protože rozpouštědlo ve formě páry je účinné při relativně vysokých teplotách a nemůže blokovat vstup do nespojitostí.

Detergenty (chemicky účinné vodní roztoky) jsou vodou rozpustné látky, jenž působí na povrchu podobně jako mýdlo. Při omývání za vyšších teplot ($40\div 80^{\circ}\text{C}$) a za pomoci kartáčů drhnutím a oplachem jsou široce účinné. Jsou to látky, které způsobují korozi a jsou na bázi solí (kyselé nebo alkalické). Proto se musí přidávat inhibitory, které zabraňují korozi. Vodní roztoky jsou chemicky aktivní a je zapotřebí je ze zkušební plochy odstranit, samozřejmě po použití řádného oplachu. Ovšem voda, která zůstane na povrchu, se odstraní sušením (vysoušeč, pec) a tím se zajistí, že voda nebude blokovat penetraci, aby se dostala do nespojitostí.

Při čištění **proudem páry** se stříkají na zkoušenou plochu vodní, zpravidla silně alkalické roztoky. Na rozdíl od detergentů se tady jedná o substituci, která působí prostřednictvím chemického procesu.

Odstraňovače barvy nebo okují působí rovněž chemickou cestou tak, že se barva nebo okuje rozpustí a kov nenapadnou. Používají se jako roztoky nebo pasta.

3.5.4 Zkušební rozsah a předčištění

V mnoha případech se stává, že zkoušený povrch předmětu není kontrolován v 100% rozsahu plochy, ale zkouší se jen určitá část dílu. Typické zkušební rozsahy jsou:

- Svarové spoje včetně tepelně ovlivněné zóny na tlakových nádobách
- Návarové konce odlitků
- Kritická místa s vrubovým účinkem na komponentech strojů a zařízení

V takovém to případě se úvodní čištění neprovádí jen na zkušebním rozsahu, ale i v přilehlé oblasti, která je cca 50mm. Důvodem dostatečného předčištění okolí se zajistí, že se během vlastního zkoušení nedostanou z okolí nějaké nečistoty do oblasti zkušebního rozsahu.

3.6 Mezičištění a sušení

Čistící prostředky se musí používat tak, aby penetrant byl důkladně odstraněn z povrchu materiálů, ale zároveň nebyl odstraněn z necelistvostí. Dojde-li však k tomu, že penetrant nebude z povrchu řádně odstraněn, vývojka se na těchto místech zbarví, i když nebude na povrchu vada či trhlina. Tomuto stavu se říká „falešná indikace“. Pokud se však čisticí prostředek použije v takové míře, že odstraní veškerý penetrant i z případných vad, po vyvolání vývojky se na povrchu vady indikují méně nebo vůbec.

Zvláště opatrně se musí postupovat, pokud se mezičistištění použije přípravek, jenžby mohl penetrant zředit. Tato situace může nastat, je-li čistící přípravek založen na bázi rozpouštědla. Při tomto mezičistištění se použije jen hadřík, který nepouští vlákna.

Při mezičistištění lze může použít i vodu, pokud je ovšem penetrant smývavý vodou. Tento způsob je možný, jelikož základní substance obsahuje vodou rozpustný glykol nebo se k penetrantu přimísí tzv. emulgátor. Díky této látce se penetrant, na olejové bázi, stane vodou smývavý.

Toto tzv. „mytí“ lze provést následovně:

- Oplachem
- Sprchou
- Otíráním vlhkým hadříkem

Způsob sušení především závisí na použitém typu vývojky. V praxi se stírání kvalitním hadříkem považuje za dostatečné pro osušení povrchu materiálu. Pokud se však zkouší malé sériové díly nebo díly, které mají komplikovanou geometrii a mohou mít zároveň drsný, hrubě opracovaný povrch, použije se jako sušení foukání tlakovým vzduchem a nakonec se při vysoké teplotě v peci jemně dosuší. Probíhá-li však toto sušení moc dlouho a za vysokých teplot, může se stát, že penetrant zaschne na hranách indikací a může ztratit částečně nebo úplně svou účinnost.

3.7 Vývojka a proces vyvolání

Vývojka je určena k tomu, aby penetrant, jenž se nachází v indikacích, vysála nahoru na zkoušenou plochu a podpořila vytvoření indikací. Po uplynutí vyvolávacího času, což je doba od začátku účinku vývojky až do vytvoření indikace, která nemění svůj tvar ani velikost, by měly být indikace na povrchu již zcela viditelné. Tato doba tedy začíná bezprostředně po zaschnutí vývojky. Aby bylo zjištěno o indikacích co možná nejvíce informací, doporučuje se po dobu vyvolávacího času indikace sledovat a pozorovat, jak se mění jejich tvar a velikost. Je vhodné pozorovat hlavně ty objekty, které jsou neznámé nebo které jsou neobvyklé.

V praxi to ovšem znamená udělat závěr z velikosti, tvaru a polohy indikace s ohledem na materiálové nespojitosti a samozřejmě jejich vliv na použitelnost zkoušeného dílu a na životnosti celého výrobku.

3.8 Konečná fáze zkoušky

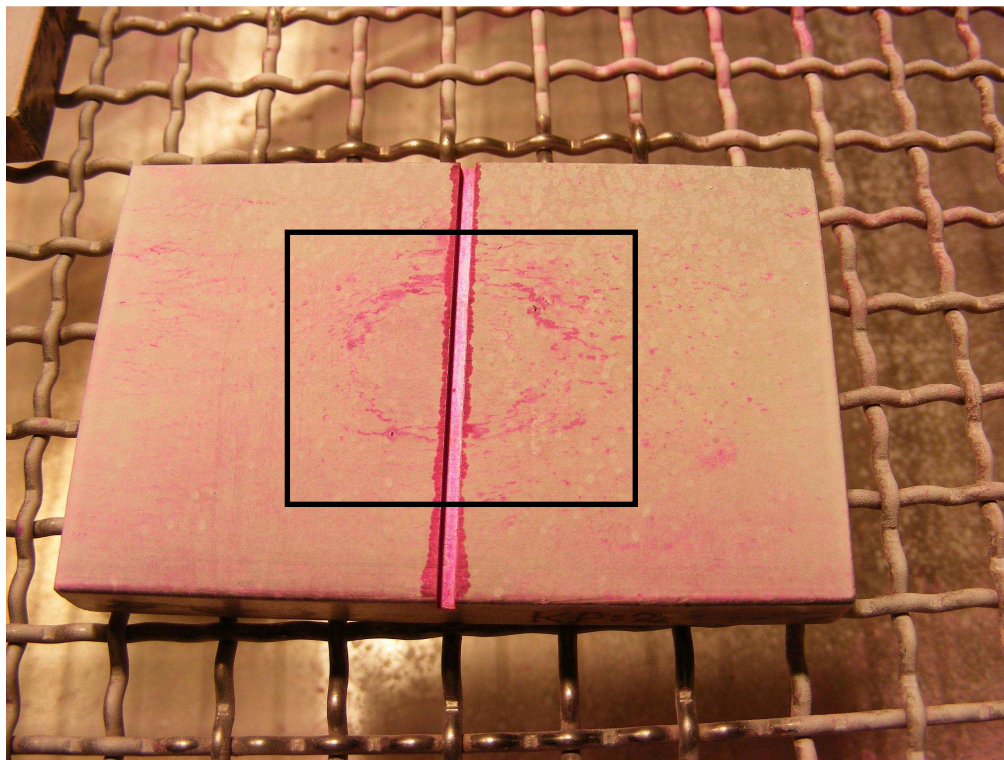
Po očištění povrchu, nanesení penetrantu a vývojky, se přejde ke konečné fázi a to k vyhodnocení zkoušky. Na povrchu zkoušeného předmětu se objeví barevná indikace zpravidla na červená na bílém pozadí. Indikace jsou vidět pouhým okem.

Může nastat i taková situace, že indikace nejsou vidět a to za předpokladu, že se zkouška neprováděla podle jasně daných pravidel. Pokud se ale prováděla a indikace nejsou viditelné, potom se pro vyhodnocení zkoušky musí předmět dát pod UV lampu (viz Obr. 27). Pak ale předpisy stanovují, že intenzita UV záření musí být minimální (EN 571: $E=10 \text{ W.m}^{-2}$) a omezují intenzitu okolního světla na velmi malé hodnoty (EN 571: 20 lx). Fluorescenční zkouška má výhodou pouze tehdy, když jsou splněny tyto podmínky. Při prohlídce kapilárních indikací je možné použít různé pomocné prostředky, jako jsou např. lupy, brýle, zlepšující kontrast apod.

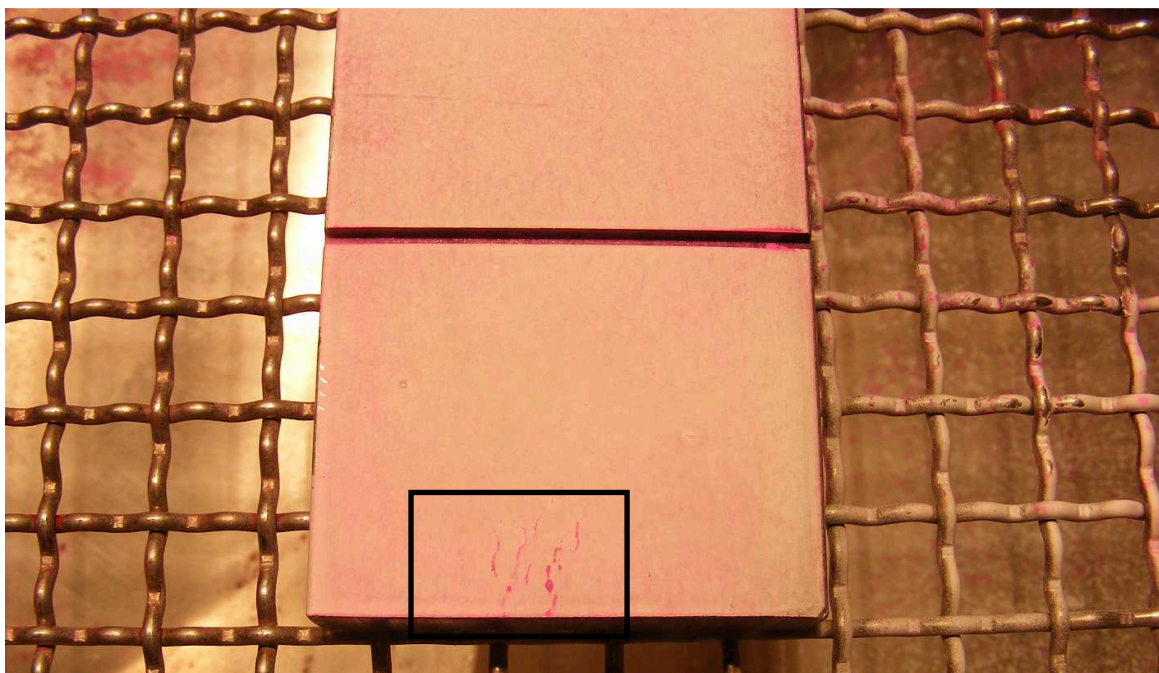


Obr. 27 – UV lampa pro vyhodnocení PT [17]

Na zkušební vzorku jsem si mohla ověřit, jak vypadají indikace, které se dají spatřit pouhým okem. Na fotografiích (viz Obr. 28a,b) je vidět, jak penetrant díky své schopnosti vzlínat „vystoupil“ na povrch.



Obr. 28a – Viditelnost indikací

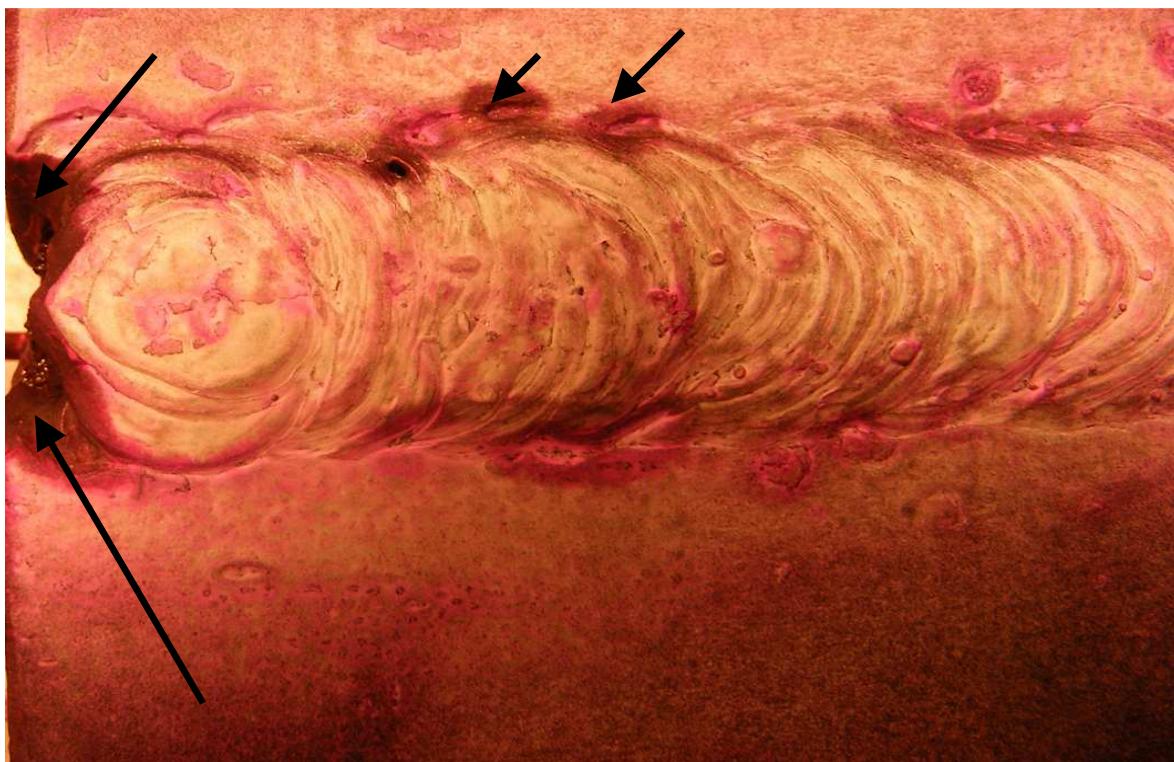


Obr. 28 b – Viditelnost indikací

Při indikacích, jako jsou na fotografiích, jsem mohla těžko posoudit, ve kterém místě svaru se indikace nacházely. Pokud nastane takový případ, je dobré si pamatovat, že penetrantnejen že má schopnost vzlínat, ale také to může vypadat, jako by byl kapalný. Červená barva penetrantu v indikacích má barvu podobnou krvi. Je mnohem červenější a jasnější. Indikace ve svaru vypadá, jako by „krvácela“ (viz Obr.29a,b).

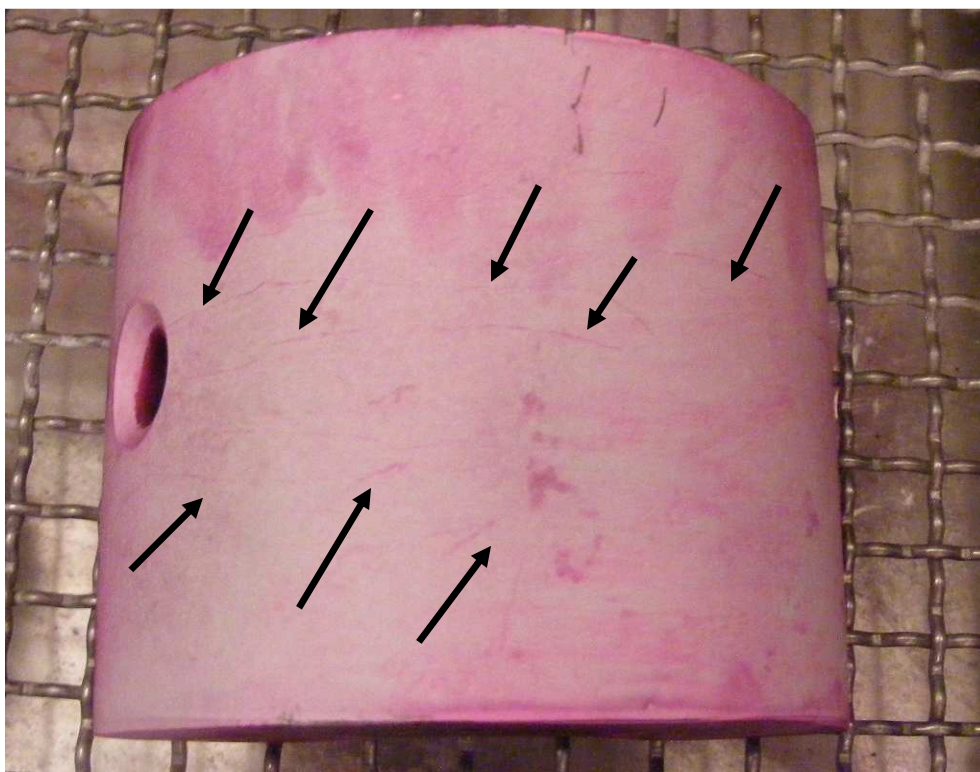


Obr. 29a – Indikace ve svaru

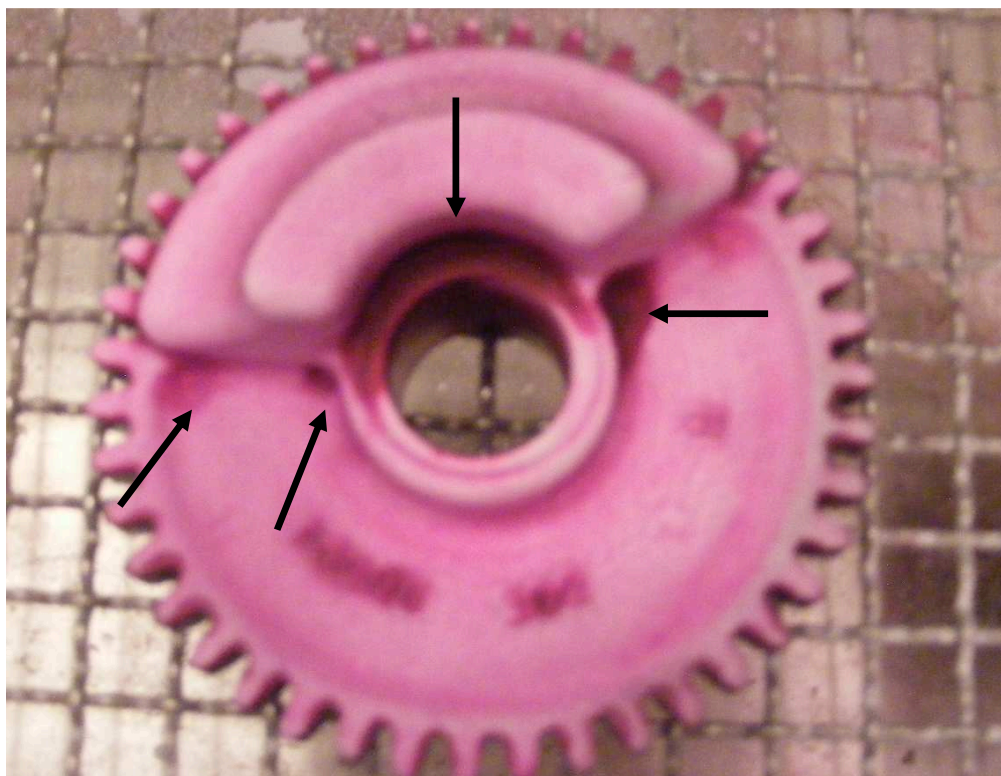


Obr. 29b – „Krvácení“ indikací

Na dalších fotografiích je možno vidět, v jaké podobě mi při zkoušce PT vystoupily nespojitosti na povrch (viz Obr. 30, Obr.31).



Obr. 30 – Ukázka nespojitostí



Obr. 31 – Ukázka nespojitostí

3.9 Vyhodnocení

Na závěr zkoušky jsem provedla vyhodnocení zkoušených dílu, které jsem zapsala do pracovního protokolu (*viz příloha 2,3*). Vše jsem řádně a čitelně zapsala do protokolu, kde jsem uvedla, jaké zkušební díly jsem zkoušela pomocí PT a následně vyhodnotila zkoušku (*viz příloha 2,3*).

Při zkoušení a následném vyhodnocení svaru (*viz Obr. 29*) jsem došla k závěru, že svar lze opravit. Nejprve se předešlý svar odstraní odklepnutím nebo ubroušením a poté se provede nové svařování.

Na *Obr. 30* je jasně patrné, že trhliny jsou po celém povrchu zkoušeného dílu a proto není vhodné již tento díl i nadále uvádět do provozu. Mohlo by se stát, že se trhliny budou vlivem mechanické účinnosti dále postupovat a prohlubovat se, což by mohlo vést k naprasknutí zkoušeného dílu.

Na fotografii (*viz Obr. 31*) jsem objevila čtyři zásadní nespojitosti, která jsou způsobeny namáháním ozubeného kola. Tyto nespojitosti jsou v místech, která jsou nejvíce namáhána a z technického i ekonomického hlediska již není vhodné tento díl opravovat ani dále uvádět do provozu.

4 ZÁVĚR

V první části bakalářské práce byly popsány a ilustrovány metody, které lze zařadit do odvětví nedestruktivní diagnostiky. Jelikož při těchto metodách není porušen jejich povrch, tvar ani fyzikální vlastnosti, jsou tyto zkoušky vhodné ke zjišťování vad, trhlin, nespojitostí.

Každá z popsaných metod má své specifické způsoby zkoušení. Jsou z ekonomického a technologického hlediska náročnější jak na samotnou přípravu dílu ke zkoušení, tak na způsob provádění zkoušky a vyhodnocování výsledků. Tyto metody jsou vhodné pro zkoušení dílů, které mohou být zkoušeny uvnitř v hale, místnosti nebo přímo v místě jeho aktuálního použití (i venku, když například potřebujeme zkoušet roury, koleje atd.).

V druhé části jsem podrobně popsala kapilární zkoušku, kterou jsem prováděla na třech zkoušených dílech. Tato metoda, oproti předešlým popsaným metodám, není náročná jak na změření nespojitostí ani na průběhu celé zkoušky.


Poté, co jsem provedla pracovní kroky, které je nutno dodržet, jsem získala výsledky tří zkoušených předmětů, dílů. U dvou z nich jsem zjistila a po následné konzultaci si ověřila, že nejsou již vhodné pro následné použití v provozu a nespojitosti jsou již tak velké, že by nebylo z ekonomického hlediska vhodné je opravovat.

U třetího dílu – svaru, však bylo zjištěno, že nespojitosti nejsou v tak velkém rozsahu, aby se díl nemohl i nadále používat v provozu. Svar, na kterém jsem objevila nespojitosti, se odklepne nebo obrousí a poté se může provést opětovné svaření.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Janu Blatoviza účinnou, metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Ostravě: 19. 5. 2011

A handwritten signature in blue ink, reading "Eva Ďásková", written over a dotted line.

(podpis autora)

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] HELEBRANT, F. – ZIEGLER, J.: *Technická diagnostika a spolehlivost II Vibrodiagnostika*. VŠB – TU, Ostrava, Ostrava 2004, 1. vydání, 178 s., ISBN 80 – 248 – 0650 – 9.
- [2] TŮMA, J.: *Zpracování signálu získaných z mechanických systémů užitím FFT*. Sdělovací technika Praha, 1997, 174 s., ISBN 80-901936-1-7.
- [3] MILÁČEK, S.: *Měření a vyhodnocování mechanických veličin*. CVUT v Praze 2001, 231 s., ISBN 80.01- 02417-2
- [4] JENCÍK, J. – VOLF, J. A KOL.: *Technická měření*. CVUT v Praze 2003, 212 s., ISBN 80-01-02138-6Dnncds
- [5] *Podkladové materiály - ADASH s.r.o., BrüelKjaer, SKF Ložiska a.s.*
- [6] Použitá literatura z firmy PTS Josef Solnař s.r.o.
- [7] KREIDL, Marcel; ŠMÍD, Radislav; *Technická diagnostika*, 1.vydání, Praha: Ben 2006, 406s., ISBN 80-7300-158-6
- [8] KOPEC, Bernard a kolektiv; *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí*, 1. vydání, Brno 2008, 571 s., ISBN 978-80-7204-591-4
- [9] JANOUŠEK, Ivo; KOZÁK, Josef; TARABA, Oldřich a kolektiv; *Technická diagnostika*, 1. Vydání, Praha 1988, 04-236-88
- [10] ČSN EN 571 – 1 (015017) *Nedestruktivní zkoušení, Kapilární zkouška – Část 1: Obecné zásady*, leden 1997
- [11] Defektoskopie v průmyslu – www.ndt.cz
- [12] *Defektoskopie v průmyslu* [online]. [citováno dne 20. února 2011]. Dostupné z WWW: <http://www.ndt.cz/prilohy/33/principy_EC.pdf>

- [13] *Defektoskopie v průmyslu* [online]. [citováno dne 20. Února 2011]. Dostupné z WWW: <http://www.ndt.cz/prilohy/41/uz_vlny.pdf>
- [14] *Defektoskopie v průmyslu* [online]. [citováno dne 20. Února 2011]. Dostupné z WWW: <http://www.ndt.cz/prilohy/43/metody_zkouseni_uz.pdf>
- [15] *Defektoskopie v průmyslu* [online]. [citováno dne 20. Únor 2011]. Dostupné z WWW: <http://www.ndt.cz/prilohy/45/uz_pristroje.pdf>
- [16] *NDT – Nedestruktivní zkoušení* [online]. [citováno dne 25. Duben 2011]. Dostupné z WWW: <<http://www.def-liberec.cz/fotogalerie>>
- [17] *ATG-Advanced Technology Group* [online]. [citováno dne 30. Duben2011]. Dostupné z WWW: <<http://www.atg.cz/cz/pdf/katalogy/KatalogNDTProduktu.pdf>>

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1: Protokol – Kontrola zkušebního systému

(počet stran: 1)

Příloha č. 2: Protokol – Pro kapilární zkoušení PT

(počet stran: 1)

Příloha č. 3: Protokol – Pro kapilární zkoušení PT

(počet stran: 1)